MÉMOIRE

SUR LA

CONSERVATION

DE LA FORCE

PRÉCÉDÉ D'UN EXPOSÉ ÉLÉMENTAIRE

DE LA

TRANSFORMATION DES FORCES NATURELLES

PAR H. HELMHOLTZ.

Docteur en médecine et en philosophie,
Professeur de physiologie à l'Université de Heidelberg,
Membre étranger des Sociétés royales de Londres, d'Édimbourg et de Liége,
de l'Académie d'Amsterdam, Membre correspondant des Académies de médecine
de Paris et de Bruxelles, des Académies de Berlin, de Vienne,
de Munich, de Gottingen, etc.

Traduit de l'allemand

PAR LOUIS PÉRARD

Ingénieur honoraire des Mines, Professeur de Physique à l'Université de Liége
Membre de la Société Royale des Sciences de la même ville, etc.

PARIS

VICTOR MASSON ET FILS

17, place de l'École-de-Médecine

MDCCCLXIX

STILLMAN DRAKE

MÉMOIRE

SUR LA

CONSERVATION DE LA FORCE

Corbeil, typ. et stér. de Crété

MÉMOIRE

SUR LA

CONSERVATION

DE LA FORCE

PRÉCÉDÉ D'UN EXPOSÉ ÉLÉMENTAIRE

DE LA

TRANSFORMATION DES FORCES NATURELLES

PAR H. HELMHOLTZ

Docteur en médecine et en philosophie,
Professeur de physiologie à l'Université de Heidelberg,
Membre étranger des Sociétés royales de Londres, d'Édimbourg et de Liége,
de l'Académie d'Amsterdam, Membre correspondant des Académies de medecine
de Paris et de Bruxelles, des Académies de Berlin, de Vienne,
de Munich, de Gottingen, etc.

Traduit de l'allemand

PAR LOUIS PÉRARD

Ingénieur honoraire des Mines, Professeur de Physique à l'Université de Liége
Membre de la Société Royale des Sciences de la même ville, etc.

PARIS

VICTOR MASSON ET FILS

17, place de l'École-de-Médecine

MDCCCLXIX

Digitized by the Internet Archive
in 2009 with funding from
University of Ottawa

http://www.archive.org/details/mmoiresurlacon00helm

PRÉFACE DU TRADUCTEUR

Le mémoire de M. Helmholtz sur le *Principe de la conservation de la Force*, a été publié pour la première fois à Berlin en 1847, c'est-à-dire peu de temps après le célèbre travail de J. R. Mayer sur le *Mouvement organique dans ses rapports avec la nutrition*.

Bien que déjà anciens, et quelquefois cités par un petit nombre d'auteurs qui se sont occupés de la théorie mécanique de la chaleur (entre autres par l'érudit et regretté Verdet), ces ouvrages ne sont pas connus autant qu'ils le méritent; celui de M. Helmholtz, surtout, ne l'est pas assez pour l'avantage du sujet dont il traite, et pourtant il offre assez d'intérêt pour être répandu ailleurs que dans sa patrie.

En effet, s'il est vrai que la théorie de l'équiva-

lent mécanique de la chaleur ne rencontre plus guère de contradicteurs sérieux ; il est vrai aussi que, sauf un petit nombre d'essais isolés, qui n'ont pas été poursuivis avec assez de continuité pour en venir à des conclusions frappantes, et capables de tenir l'attention en éveil, on ne s'occupe guère encore aujourd'hui d'élargir le champ de cette conception si féconde et si digne du grand domaine qu'elle attend.

A ce point de vue donc, l'œuvre de M. Helmholtz (le *Principe de la conservation de la Force*) possède entièrement l'intérêt d'une découverte nouvelle : C'est un plan complet de la physique moderne. A l'heure où presque tous les physiciens s'attachaient exclusivement à la démonstration du principe éminemment fécond, mais encore restreint, de l'équivalent mécanique de la chaleur, son esprit pénétrant s'est élevé d'un élan au-dessus d'un horizon immense ; il a contemplé à la fois l'imposante apparition de l'unité de la science et celle de l'incomparable harmonie des phénomènes naturels; il a embrassé d'un large coup d'œil toutes les possessions du savoir humain et toutes ses lacunes ; il a indiqué les points vers lesquels doivent désormais converger les efforts des chercheurs.

L'avenir réserve sans doute à ce vaste plan quel-

ques modifications, peut-être même quelques simplifications ; mais il ne perdra jamais la vigoureuse empreinte de ses principaux traits.

N'ai-je pas assumé une trop lourde responsabilité en entreprenant l'interprétation d'une œuvre de si grande valeur? La réponse ne serait pas douteuse, si l'auteur ne m'avait pas accordé son bienveillant secours : en daignant revoir lui-même les épreuves, et surtout en apportant à son travail primitif certains changements, M. Helmholtz a bien voulu faire de cette traduction une véritable édition nouvelle, destinée à suppléer au vide laissé, même en Allemagne, par l'épuisement des éditions originales.

J'ai cru faire une chose utile également en ajoutant comme introduction à cet important travail, un *Exposé élémentaire de la transformation des forces de la nature*, que M. Helmholtz a pris, il y a quelques temps, pour sujet d'une conférence publique.

Grâce à cette addition, toute personne peu habituée aux considérations scientifiques pourra facilement, j'espère, se rendre un compte exact de cette belle question, qui n'est pas, loin s'en faut, dénuée d'intérêt philosophique ni poétique.

L. P.

Liége, avril 1869.

EXPOSÉ ÉLÉMENTAIRE

DE LA

TRANSFORMATION DES FORCES NATURELLES

La Physique a fait dans ces dernières années une conquête d'un immense intérêt. Il s'agit d'une loi nouvelle dont la généralité embrasse l'action de toutes les forces de la Nature, et qui, par conséquent, a autant d'importance pour la conception théorique des phénomènes, que pour les applications techniques.

C'est l'histoire et la destinée de cette conquête que l'on se propose d'exposer dans cet écrit.

A la limite du Moyen âge et de l'Age moderne, les sciences naturelles commencèrent à prendre un essor rapide. Fortifiée par les mathématiques, la Mécanique se signala, entre tous les arts d'application, par des progrès considérables.

Mais alors la Mécanique pratique avait un tout autre caractère qu'aujourd'hui. Étonnée et enivrée de ses propres succès, son enthousiasme juvénile n'admettait plus de questions insolubles ; elle attaquait les problèmes les plus difficiles et les plus compliqués, sans tenir compte de leur utilité immédiate. Par exemple, elle

cherchait à contrefaire les animaux et même l'homme, sous la forme des automates.

C'est ainsi que Vaucanson émerveilla son siècle avec son canard qui mangeait et digérait ; avec son joueur de flûte qui remuait très-correctement les doigts ; Droz *aîné*, avec son jeune homme qui écrivait, et Droz *jeune*, avec sa pianiste, dont les yeux surveillaient le doigté, et qui, à la fin de son exécution, saluait gracieusement l'assistance.

Vaucanson et les deux Droz auraient sans contredit supporté dignement la comparaison avec les esprits les plus ingénieux de notre temps : on aurait peine à comprendre qu'ils auraient dépensé une si grande somme de temps et de peine, une perspicacité si extraordinaire, pour construire ces automates, s'ils n'avaient pas très-sérieusement espéré pouvoir résoudre un problème que nous regardons aujourd'hui comme puéril.

Le jeune garçon écrivant de Droz aîné était encore montré publiquement en Allemagne, il y a quelques années. Son mécanisme est si compliqué, qu'un esprit inculte ne peut en deviner la marche. Mais si l'on se rappelle que ce garçon et son inventeur, soupçonnés de magie, ont été retenus longtemps dans les cachots de l'inquisition espagnole, et n'ont obtenu qu'à grand' peine leur mise en liberté, on peut croire que ce mécanisme paraissait à cette époque imiter assez bien l'homme, pour inspirer des doutes sur sa constitution naturelle.

Probablement les inventeurs de ces automates ne nourrissaient point l'espoir de donner aux créatures de leur génie une âme douée de perfections morales ;

mais qui ne renoncerait pas volontiers aux perfections morales de ses serviteurs, pour être en même temps débarrassé de leurs défauts ? qui ne préférerait les services réguliers d'une machine, la solidité du bronze et de l'acier, à la fragilité de la chair et des os ?

Le but que se proposaient les artistes mécaniciens du siècle dernier était parfaitement sérieux ; dans le fond, il n'avait rien de frivole ; la poursuite énergique de ce but ne fut pas sans influence sur le progrès des procédés mécaniques, et servit ainsi de point d'appui à des travaux plus féconds.

On ne cherche plus aujourd'hui des machines accomplissant les fonctions nombreuses et variées d'un seul homme ; mais au contraire on demande à chaque machine de remplacer des milliers d'hommes dans l'accomplissement d'un service unique.

Cette tendance à imiter les créatures vivantes paraît avoir donné naissance — toujours par suite d'un malentendu — à une idée analogue à celle de la Pierre Philosophale, qui avait tant occupé le dix-septième et le dix-huitième siècle : à l'idée du Mouvement Perpétuel !

Il faut entendre par là une machine qui doit rester constamment en activité, sans avoir besoin d'être remontée, sans avoir besoin d'une chute d'eau, ni du vent, ni de toute autre force naturelle ; enfin une machine qui doit sans relâche créer elle-même sa propre force motrice.

L'homme et les animaux ne sont-ils pas la réalisation de cette idée, puisqu'ils se meuvent avec force et persistance, tout le temps de leur vie, sans que personne les

remonte ou les aide à se mouvoir? On n'avait pas alors la moindre notion exacte de la corrélation qui existe entre l'alimentation et le déploiement de la force.

On croyait que la nourriture ne servait qu'à lubrifier les rouages du corps, ou à remplacer les pièces usées, ou à rajeunir celles qui sont trop vieilles ; on croyait que la création spontanée de la force était la propriété la plus essentielle, la vraie quintessence de la vie organique; en sorte que, pour imiter l'homme, il fallait d'abord trouver le mouvement perpétuel.

Cette espérance fut la mère d'une autre, d'un rang secondaire encore. Le mouvement perpétuel doit créer sans dépense un travail inépuisable, c'est-à-dire *transformer* Rien *en* Quelque chose. Or le travail se traduit en argent : donc la solution du grand problème pratique s'offrait sous cette forme de l'or, que tous les habiles de tous les temps poursuivent par les voies les plus diverses. Dans notre siècle *plus positif*, cette idée a passé du second rang au premier.

Transformer Rien en Argent offre une ressemblance complète avec la Pierre Philosophale; ce rêve des anciens alchimistes était aussi la quintessence de la vie organique, et contenait le pouvoir de tout transformer en Or.

L'aiguillon était vif; on ne pourrait sans injustice nier le talent de quelques-uns des chercheurs. Mais ce genre de problème était fait pour absorber les cerveaux creux, les retenir durant de longues années dans le même cercle, les éblouir à chaque instant par l'appât d'une lumière nouvelle, qui semblait s'approcher toujours, et ne les conduisait souvent, hélas ! qu'à

la folie. Le fantôme, toujours en vue, restait insaisissable.

Il n'est pas possible de tracer l'histoire de ces travaux ; car les esprits les plus sages, parmi lesquels il faut citer Droz aîné, se persuadèrent bientôt de la vanité de leurs efforts ; et l'on conçoit qu'ils ne furent pas trop disposés à en parler.

Cependant, quelques malheureux annonçaient assez souvent qu'ils avaient fait la grande découverte ; mais l'inexactitude de leur prétention étant toujours promptement démontrée, l'objet ne tarda pas à être discrédité, et peu à peu l'impossibilité de la solution cherchée parut certaine à tout le monde. Enfin la Mécanique rationnelle, déblayant les difficultés les unes après les autres, éclairait la route et démontrait d'une façon rigoureuse et absolue, que nulle force mécanique n'était capable d'engendrer le mouvement perpétuel.

Nous arrivons ici à la notion de la *Force Motrice,* ou de la Force nommée *Travail des Machines*, dont nous aurons par la suite à tirer un grand parti.

Cette notion du *Travail* s'est évidemment transportée aux machines, lorsque l'on a comparé leurs fonctions à celles des hommes et des animaux qu'elles devaient remplacer. Aujourd'hui encore le travail des machines est évalué en force de cheval.

La valeur du travail de l'homme est déterminée, soit d'après le déploiement de force correspondant au labeur, et alors c'est tout simplement l'ouvrier le plus robuste qui est le plus apprécié ; soit d'après l'habileté qu'exige la tâche. Dans ce dernier cas, l'appréciation est moins simple : on ne trouve pas, d'un moment à l'autre, un

nombre quelconque de travailleurs habiles, instruits, possédant un certain talent, fruit de l'éducation, du temps et des soins.

Au contraire, une machine capable de bien exécuter un certain travail peut toujours être multipliée en nombreux exemplaires : son efficacité étant toujours la même, sa valeur ne varie pas non plus. Elle diffère en cela de l'habileté humaine, tant que celle-ci n'est pas suppléée par la force inorganique.

Le travail des machines est donc défini par la seule considération de la force. Cette remarque est d'autant plus importante, que la plupart des machines sont réellement destinées à surpasser l'homme et les animaux par la grandeur de leurs effets.

Ainsi, dans ce qui va suivre, l'idée du travail est liée à celle de la force, c'est-à-dire que nous donnons à cette idée sa signification vraiment mécanique. Il s'agit maintenant de mesurer la force de manière à rendre les diverses machines comparables. Pour cela, nous ne pouvons éviter de traverser le champ un peu aride de la Mécanique ; mais ce sera pour nous élever à un point de vue d'où s'ouvrira pour nous un horizon tellement large et beau, que nous serons bien dédommagés de nos peines.

Pour fixer les idées, prenons l'exemple d'une roue à eau activant un marteau de forge.

Ce choix n'offre ici aucune prétention romantique, car nous passerons sous silence la description de la vallée, de la sombre forêt, du ruisseau qui se précipite en écumant, des noirs visages des Cyclopes illuminés par les étincelles de la forge ; et nous concentrerons toute

notre attention sur les détails plus prosaïques de l'appareil mécanique.

Cet appareil est mû par une roue hydraulique; la roue, à son tour, est mise en mouvement par la masse d'eau qui tombe. L'axe de la roue est garni de petites saillies ou cames qui, pendant la rotation, saisissent les manches des lourds marteaux, les soulèvent et les laissent retomber. Chaque marteau, en retombant, façonne une pièce de fer placée dessous.

Ainsi le travail de cette machine consiste à lever le marteau, c'est-à-dire à vaincre la pesanteur de sa masse. L'effort est donc, toutes choses égales d'ailleurs, proportionnel au poids du marteau; pour un marteau d'un poids double, l'effort serait double.

Quant à l'effet du marteau, il ne dépend pas uniquement de son poids, mais de la hauteur de sa chute : l'effet est plus grand avec deux mètres qu'avec un mètre de chute.

Or, on comprend qu'après avoir dépensé une certaine force pour élever le marteau à un mètre, la machine devra renouveler la même dépense pour l'élever jusqu'à un second mètre. Donc son travail n'augmente pas seulement proportionnellement au poids du marteau, mais aussi proportionnellement à la hauteur à laquelle elle doit l'élever. Il est clair alors que ce travail a pour mesure le produit du poids soulevé multiplié par la hauteur de l'élévation.

Telle est la mesure adoptée dans la mécanique : l'unité du travail mécanique est le kilogrammètre (ou bien livre-pied), c'est-à-dire un kilogramme élevé à un mètre (ou bien une livre élevée à un pied de hauteur).

Tandis que le travail de notre roue consiste uniquement à élever les têtes pesantes des marteaux, la force motrice qui la fait tourner est due à la masse d'eau qui est tombée.

Il n'est pas indispensable que la chute de l'eau soit verticale ; elle peut couler dans un lit un peu incliné, mais il faut toujours, pour mouvoir des roues, qu'elle s'écoule d'un lieu élevé vers un autre situé plus bas. L'expérience et la théorie sont d'accord pour nous apprendre que pour élever un marteau d'un quintal à un mètre de hauteur, il faut *au moins* un quintal d'eau descendant d'un mètre, ou deux quintaux descendant d'un demi-mètre, ou quatre quintaux d'un quart de mètre, etc. En d'autres termes, si nous prenons le poids de l'eau multiplié par la hauteur de sa chute, pour mesure de son travail, comme nous l'avons fait pour le marteau, alors le travail qu'effectue la machine en soulevant le marteau, exprimé en kilogrammètres (ou en livres-pieds), ne peut être, dans les cas les plus favorables, qu'exactement aussi grand que le nombre de kilogrammètres donnés par la chute d'eau dans le même temps.

En réalité, cette égalité n'existe jamais, car une grande partie de travail de l'eau reste inutilisée ; quelquefois on sacrifie une partie de la force pour obtenir une plus grande vitesse.

Remarquons encore que cette relation est invariable, soit que l'axe de la roue attaque directement les marteaux, soit que l'on interpose entre l'axe et le marteau des engrenages, des vis sans fin, des poulies à courroies, etc.

Ces intermédiaires peuvent rendre la roue hydrauli-

que capable d'élever un marteau pesant dix quintaux au lieu d'un, comme nous l'avons supposé avec la disposition simple adoptée d'abord ; mais ce marteau dix fois plus lourd ne sera soulevé qu'à un dixième de la hauteur primitive, ou bien mettra dix fois plus de temps pour monter à la même hauteur.

Enfin, dans quelque rapport que nous fassions varier l'intensité de la force motrice pendant le temps nécessaire pour que le ruisseau livre un certain poids d'eau, nous n'obtiendrons jamais du mécanisme qu'un travail déterminé.

Ainsi notre mécanisme ne fait rien de plus qu'utiliser la pesanteur de l'eau qui tombe, pour vaincre la pesanteur de ses marteaux et les élever. Quand il a porté l'un de ces marteaux à la hauteur nécessaire, il l'abandonne et le laisse se précipiter sur la pièce métallique qui lui est présentée, pour forger cette pièce.

Mais pourquoi le marteau produit-il un plus grand effet en tombant sur la pièce à façonner qu'en restant simplement appuyé sur celle-ci ? Pourquoi la puissance du marteau est-elle d'autant supérieure qu'il tombe de plus haut, et que par conséquent sa vitesse de chute est plus considérable ? Ici nous trouvons que la quantité de travail du marteau est liée à la vitesse avec laquelle il rencontre la pièce à forger.

Dans d'autres circonstances il en est encore ainsi : la vitesse des masses en mouvement est un moyen de produire les effets énergiques. Il suffit de rappeler, soit la balle de fusil, qui, à l'état de repos, est l'objet le plus inoffensif, et qui, chassée de l'arme, produit des effets terribles ; soit le moulin à vent, qui puise sa force mo-

trice dans l'air en mouvement. Il est permis de se demander comment la mobilité, qui semble une propriété non essentielle, et même fugitive de la matière, peut produire des actions si énergiques.

En réalité, le mouvement ne nous paraît si fugitif dans le cours ordinaire des choses, qu'à cause de l'influence de forces toujours opposées, telles que le frottement, la résistance de l'air, etc., qui affaiblissent sans cesse et finissent par anéantir les mouvements des corps terrestres. Mais si un corps, ayant reçu une impulsion, n'était assujetti à aucune de ces résistances, il continuerait à se mouvoir éternellement sans la moindre diminution de vitesse.

On sait, par exemple, que les planètes parcourent l'espace libre de la même manière depuis des siècles. Pour ralentir et anéantir le mouvement, il faut des résistances. Un corps tel que notre marteau ou la balle, animé de vitesse et frappant un autre corps, comprime celui-ci, ou le traverse, jusqu'à ce que la somme des résistances qu'il oppose à la compression ou à la désagrégation, soit devenue suffisante pour anéantir la vitesse du marteau ou de la balle.

On appelle *Force vive* d'une masse, le mouvement de cette masse pendant qu'elle effectue un travail. Le mot *vive* n'a aucun rapport de signification avec la nature vivante ; il ne sert qu'à établir une distinction nécessaire entre la force due au mouvement et l'équilibre qui correspond à une position invariable, tel, par exemple, que le poids d'un corps en repos exerçant une pression continue sur son support, sans y occasionner aucun changement.

Dans notre forge, le travail apparaît d'abord sous la

forme d'une chute d'eau ; ensuite sous la forme d'un marteau soulevé ; enfin sous la forme de force vive dans la chute de ce même marteau. Cette troisième forme pourrait être convertie dans la première, si, par exemple, le marteau frappait sur un sommier d'acier parfaitement élastique, assez fort pour lui résister. Alors la tête du marteau rebondirait, et, dans le cas le plus favorable, il pourrait remonter à la hauteur dont il est tombé, mais jamais plus haut. Sa masse s'élèverait donc, et au moment où elle atteindrait le point le plus élevé, elle représenterait le même nombre de kilogrammètres qu'avant la chute, mais jamais davantage. En d'autres termes : *la force vive peut engendrer un travail égal au travail qui a engendré la force vive : elle est donc l'équivalent de ce travail.*

Nos horloges marchent au moyen de poids qui descendent, comme nos montres, au moyen de ressorts tendus. Un poids qui repose à terre, un ressort élastique débandé, n'effectuent aucun travail ; pour en obtenir un effet, il faut élever le poids, il faut tendre le ressort. C'est ce qui arrive en remontant l'horloge ou la montre. L'homme qui remonte l'horloge communique à son poids ou au ressort un quantum de force de Travail ; tout ce qu'il aura communiqué à ce poids ou à ce ressort sera exactement restitué peu à peu dans les vingt-quatre heures suivantes ; et cette restitution sera dépensée pour vaincre le frottement des rouages, la résistance de l'air contre le pendule.

Les rouages de la montre ne créent donc aucun travail, mais ils répartissent peu à peu sur un temps plus long le travail qui leur a été fourni précédemment.

Au moyen d'une pompe de compression l'on introduit une grande masse d'air dans le cylindre d'un fusil à vent. En ouvrant ensuite le robinet du cylindre, l'air comprimé se répand dans l'âme du fusil et pousse la balle avec une vivacité égale à celle de la poudre enflammée. Or, on sait évaluer le travail dépensé pour fouler l'air, ainsi que la force vive communiquée au projectile ; cette dernière quantité n'est jamais plus grande que la première.

L'air comprimé n'a pas créé de Travail ; il n'a fait autre chose que restituer le Travail qui lui avait été communiqué. S'il a fallu pomper pendant un quart d'heure pour charger le fusil à vent, le tir a dépensé toute la force en quelques secondes, et la force dégagée en peu de temps a imprimé à la balle une vitesse incomparablement plus grande que n'aurait pu le faire le jet à la main.

Ces exemples confirment ce que la théorie mathématique avait déjà démontré pour toutes les actions purement mécaniques, c'est-à-dire pour toutes les forces uniquement engendrées par le mouvement même, savoir : *nos machines et nos appareils ne créent jamais la force ; elles restituent, sous une forme nouvelle, les forces ordinaires de la nature qui lui ont été communiquées sous forme de chute d'eau, ou de tension musculaire de l'homme et des animaux, ou d'air en mouvement*, etc.

Après que les grands géomètres du dix-huitième siècle ont démontré d'une façon irrécusable cette loi générale, le mouvement perpétuel n'utilisant que la Pesanteur, l'Élasticité et la Pression des fluides, ne

pouvait plus séduire que les hommes d'un jugement faux ou inculte.

Mais il existe un autre ordre de forces naturelles qui ne sont pas considérées comme des causes de mouvement; ce sont : la Chaleur, l'Électricité, le Magnétisme, la Lumière, l'Affinité chimique; ces forces manifestent très-souvent leur présence dans les phénomènes mécaniques. Il serait difficile de citer une action naturelle de n'importe quel genre, qui ne soit accompagnée d'effets mécaniques, et par laquelle on ne puisse gagner du travail.

La question du Mouvement Perpétuel restait donc encore posée ; la physique moderne a réalisé un progrès considérable, en la résolvant comme nous allons le voir.

Dans le fusil à vent, c'est le bras de l'homme qui a fourni, en comprimant l'air, le travail qui devait être produit par la détente. Dans les armes à feu ordinaires, la masse de gaz qui chasse le projectile est obtenue d'une tout autre façon : c'est par la combustion de la poudre. La poudre à tirer, en brûlant, se transforme en produits gazeux qui occupent un volume beaucoup plus grand que le volume solide. Ainsi l'emploi de la poudre à tirer épargne à l'homme le travail que son bras avait dû effectuer, emmagasiner, dans le fusil à vent.

Il en est de même dans nos plus puissantes machines : dans la machine à vapeur, c'est un corps gazeux fortement comprimé, la vapeur d'eau, qui, par sa faculté expansive, met le mécanisme en mouvement.

Et dans ces appareils ce n'est pas le bras de l'homme

ni une force mécanique ordinaire, qui comprime la vapeur; c'est la chaleur qui, introduite dans une masse d'eau contenue dans la chaudière, transforme cette eau en vapeur; et celle-ci, étant renfermée dans un espace étroit, s'élève à une forte pression.

C'est donc la chaleur que nous avons produite qui engendre la force mécanique. Cette chaleur nécessaire à l'échauffement de la chaudière peut être obtenue par plusieurs voies : la plus ordinaire est celle qui consiste à brûler du charbon.

La combustion est une action chimique. Un des éléments de notre atmosphère, l'oxygène, a une grande force d'attraction, ou, comme on dit dans le langage de la chimie, une grande affinité pour les éléments des corps combustibles; mais cette affinité n'entre en jeu qu'à une assez haute température. Dès qu'une partie du corps combustible, par exemple le carbone, est suffisamment échauffée, celui-ci s'unit très-vivement avec l'oxygène de l'atmosphère, et forme un gaz particulier, l'acide carbonique, ce même gaz qui s'échappe de la bière et du vin mousseux.

Cette combinaison donne naissance à la chaleur et à la lumière; d'ailleurs, en général, toute combinaison chimique de deux corps, ayant une grande affinité l'un pour l'autre, dégage de la chaleur, et si cette chaleur s'élève jusqu'au rouge, elle est accompagnée de lumière.

En résumé, ce sont des effets et des forces chimiques qui fournissent les prodigieuses quantités de travail des machines à vapeur. Dans les armes à feu, c'est aussi une action chimique, la combustion de la poudre, qui imprime la force vive au projectile.

Or, s'il est vrai que la machine à vapeur développe son travail au moyen de la chaleur, il est également vrai que la force mécanique peut engendrer de la chaleur ; tout choc, tout frottement est une source de chaleur. Un forgeron habile pourrait à la rigueur porter au rouge une cale de fer à l'aide de son marteau seul ; les axes des roues de wagons doivent être lubrifiés avec soin pour être préservés de l'échauffement par le frottement. On a même utilisé ce fait sur une grande échelle. Dans certaine usine où existait une force superflue de chute d'eau, on a employé celle-ci à faire glisser l'une sur l'autre deux grandes plaques de fer, dont l'une tournait sur un axe, de sorte qu'elles s'échauffaient fortement. La chaleur gagnée rayonnait dans la pièce où se faisait cette opération, et y remplissait l'office d'un foyer sans combustible.

On se demande alors si la chaleur provenant de ces deux plaques ne suffirait pas à activer une petite machine à vapeur, laquelle à son tour entretiendrait leur mouvement ? Le Mouvement Perpétuel serait trouvé.

Cette question avait bien le droit d'être posée : les recherches antérieures des géomètres étaient sans solution à cet égard. Cependant, hâtons-nous de dire, et nous le démontrerons, que la loi générale déjà énoncée y répond négativement.

Un spéculateur américain excita, il y a quelques années, le monde industriel de l'Europe, par un projet analogue. On connaît les appareils magnéto-électriques, appliqués quelquefois au traitement des rhumatismes et des paralysies : dans ces machines, la rotation rapide

d'un aimant donne de violentes secousses électriques. Le courant étant conduit à travers l'eau, ce liquide est décomposé en ses deux éléments, l'Hydrogène et l'Oxygène.

La combustion de l'Hydrogène reproduit l'eau.

Cette combustion ayant lieu, dans l'oxygène pur, et non pas dans l'air atmosphérique qui ne contient qu'un cinquième d'oxygène, si l'on place un morceau de craie dans la flamme, cette craie devient brillante et donne la lumière de Drumond, comparable à celle du soleil. Cette flamme est extrêmement chaude. Le spéculateur américain voulait utiliser les gaz provenant de l'eau décomposée par le courant; il espérait, en les combinant, c'est-à-dire en les brûlant, obtenir une quantité de chaleur suffisante pour faire marcher une petite machine à vapeur. Celle-ci, à son tour, devait entretenir la rotation de l'aimant, la décomposition de l'eau, et enfin reproduire sans cesse sa provision de combustible.

C'était là, incontestablement, la plus belle découverte du monde, un mouvement perpétuel accompagné de la plus splendide lumière et d'un chauffage éminemment économique pour les appartements. Ce n'était pas mal imaginé, car chacune des phases de l'opération totale était possible; seulement les personnes qui connaissaient déjà les travaux des physiciens sur ce sujet, ne pouvaient manquer de comprendre dès l'abord que cette spéculation pouvait être classée parmi les nombreux contes dont l'Amérique a le fertile privilége. Et en effet cette spéculation resta un conte, et rien de plus.

Ne multiplions pas les exemples : on saisit aisément la liaison étroite qui unit la Chaleur, l'Électricité, le Magnétisme, la Lumière, l'Affinité chimique, avec les forces mécaniques. De chacune de ces manifestations différentes des forces naturelles, peut dériver chacune des autres, et cela non pas par une voie unique, mais par plusieurs voies différentes. C'est le chef-d'œuvre du tisserand décrit par le poëte !

« Le pied commande, et mille fils soulevés sont « traversés et retraversés par la navette rapide; les fils « passent invisibles, et mille nœuds sont serrés d'un « seul coup. »

S'il existait un procédé quelconque pouvant, au moyen de la force mécanique, faire naître des actions chimiques, électriques, ou d'autres actions naturelles, et s'il était possible, sans rien changer aux masses toujours actives du mécanisme, de refaire, par un détour quelconque, de la force mécanique en plus grande quantité qu'il n'en a été dépensé d'abord, il est évident qu'*une partie de la force ainsi gagnée pourrait être employée à entretenir le mouvement de la machine, et le reste à d'autres usages.*

C'est ainsi qu'on est arrivé à chercher dans le réseau compliqué des actions réciproques des forces naturelles, un procédé qui, partant des forces mécaniques, et passant par les actions chimiques, électriques, magnétiques et thermiques, pût revenir à des forces mécaniques avec un excédant final de travail; c'était le Mouvement Perpétuel.

Mais, instruit par l'insuccès des expériences récentes, on était devenu plus prudent, et, en définitive, il n'y eut

pas beaucoup de propositions promettant le mouvement perpétuel; mais on intervertit le problème. On chercha plus à utiliser les relations connues et inconnues entre les forces naturelles pour édifier le Mouvement Perpétuel; au contraire, en se fondant sur l'impossibilité du mouvement perpétuel, on chercha *quelles doivent être les relations entre les forces naturelles?*

Ce renversement de la question était un grand pas : car en formulant l'impossibilité du Mouvement Perpétuel, il devenait facile d'établir complétement les relations qui doivent nécessairement exister entre les forces de la nature; et l'on trouva que toutes ces relations s'unissent aux conséquences de cette proposition.

On découvrit en même temps une suite de propositions encore inconnues, dont l'expérience devait démontrer l'exactitude. Si une seule de ces propositions avait été démontrée inexacte, c'est que le Mouvement Perpétuel était possible.

Le premier qui dirigea ses études dans cette voie fut un Français, Sidi Carnot, en 1824. Malgré la vue trop étroite du sujet, et une connaissance incomplète de la nature de la chaleur, qui le conduisirent à des conclusions fausses, son travail ne fut pas sans fruit. Il énonça le premier une loi qui porte son nom, et sur laquelle je reviendrai.

Son travail resta longtemps inaperçu ; ce n'est que dix-huit ans plus tard, vers 1842, que la même idée vint à plusieurs savants, dans différents pays, et indépendamment même de Carnot.

Le premier qui découvrit et énonça exactement la loi générale dont il s'agit, fut un médecin allemand, Jules-

Robert Mayer, de Heilbronn, en 1842. Un peu plus tard, en 1843, un Danois, Colding, communiqua à l'Académie de Copenhague un mémoire qui énonçait la même loi, et contenait quelques vues plus étendues sur le même objet. En Angleterre, Joule avait commencé en même temps une série de recherches dans le même sens.

Il arrive souvent que plusieurs esprits, à l'insu les uns des autres, occupés d'une question amenée par le développement naturel des sciences, mettent spontanément au jour un résultat identique.

L'auteur même de cet écrit, sans connaître les travaux de Mayer et de Colding, et n'ayant eu connaissance de ceux de Joule qu'après l'achèvement de son travail, a suivi la même route, et chercha à déterminer toutes les relations qui peuvent exister entre les actions de la nature, d'après le principe de l'*impossibilité de créer quelque chose de rien ;* il publia ses recherches en 1847 dans un mémoire portant le titre de « Conservation de la Force (1). »

Le public n'a cessé de s'intéresser de plus en plus à cette importante question, surtout en Angleterre. La plupart des conséquences essentielles de cette nouvelle conception, auxquelles manquait encore la sanction expérimentale, furent l'objet des travaux de Joule ; et, dans ces dernières années, le plus illustre physicien de la France, Regnault, accueillant la nouvelle manière de voir, lui a fourni un grand appui par ses belles recherches sur la chaleur spécifique des gaz.

Si quelques-unes des conclusions ne sont pas en-

(1) Voir page 52 de ce volume.

core confirmées à l'heure qu'il est par les faits, le nombre des vérifications est suffisant pour qu'il ne soit pas prématuré d'en entretenir la grande généralité du public.

Quant à la question de la génération des Forces, la solution se prévoit, d'après ce qui vient d'être exposé. *Il n'existe, dans toute la série des actions naturelles, aucun procédé qui permette d'engendrer de la force mécanique sans une dépense correspondante.*

Le mouvement perpétuel est donc impossible ; cette proposition donne un haut intérêt à nos considérations.

Nous n'avons encore considéré jusqu'ici le développement de la force dans les actions naturelles qu'au point de vue de son utilité dans le travail des machines. Nous sommes arrivés à une loi générale, indépendante des applications qui sont l'œuvre humaine. L'expression de cette loi doit contenir cette signification plus générale.

D'abord il est évident que le travail, qui peut être effectué par une action naturelle dans une machine convenablement conditionnée, et qui peut être mesuré comme nous l'avons indiqué, le travail est un terme de comparaison universel pour toutes les espèces de forces. Ensuite, si la quantité de force mécanique ne s'augmente jamais sans une dépense équivalente ; réciproquement, cette quantité ne peut diminuer et ne se perd jamais. Elle peut bien être perdue pour l'usage spécial que nous en faisons, si nous échappons l'occasion de diriger vers cet usage l'action naturelle ; mais, pour l'Univers, elle ne s'anéantit point.

L'ancienne Mécanique prétendait que le choc et le frottement de deux corps anéantissaient tout simplement de la force vive. Mais on a déjà dit que le choc et le frottement sont des sources de chaleur ; Joule a démontré cette importante loi, que chaque kilogrammètre de travail qui disparaît est remplacé par une certaine quantité de chaleur, et que, la chaleur étant une source de travail, chaque kilogrammètre de travail produit remplace une certaine quantité de chaleur qui disparaît.

La quantité de chaleur nécessaire pour élever d'un degré centigrade la température d'un kilogramme d'eau est équivalente au travail mesuré par 423 kilogrammètres, c'est-à-dire par l'élévation de 423 kilogrammes à 1 mètre de hauteur verticale.

Ajoutons que ces propositions conduisent nécessairement à cette conclusion, que la chaleur n'est pas, comme on le croyait généralement autrefois, une substance impondérable, mais bien, comme la lumière et le son, une forme particulière de vibration moléculaire.

Ainsi, dans le choc et le frottement, le mouvement sensible qui disparaît de toute la masse, se transforme en mouvement des molécules ; la création de force motrice par la chaleur n'est autre chose que le mouvement des molécules qui se transforme en mouvement sensible de toute la masse.

Les combinaisons chimiques donnent de la chaleur ; la quantité qu'elles en donnent est indépendante de la durée et de la marche qu'elles ont pu suivre, pourvu que d'autres actions ne s'y soient pas mêlées.

La quantité de travail des forces chimiques est généralement très-grande. Un kilogramme de charbon de

bonne qualité donne en brûlant assez de chaleur pour élever d'un degré centigrade la température de 8,000 kilogrammes d'eau ; par conséquent, la quantité d'attraction chimique entre les molécules d'un kilogramme de charbon et de son équivalent d'oxygène, est capable d'élever 1,000 kilogrammes à environ 3 kilomètres et demi de hauteur.

Malheureusement nos machines ne transmettent qu'une très-faible fraction de cet énorme travail ; la différence se disperse sous forme de chaleur dans les organes et dans l'air ambiant, sans utilité immédiate pour la fonction même de l'appareil : c'est à peine si l'on utilise 18 pour 100 de ce travail dans les meilleures machines à détente.

En observant toutes les autres actions connues, tant physiques que chimiques, on voit que l'univers possède une provision de force disponible qui ne peut ni croître, ni décroître.

La quantité de force capable d'agir, qui existe dans la nature inorganique, est éternelle et invariable, tout aussi bien que la matière.

En énonçant sous cette forme la loi générale, je l'ai nommée Principe de la conservation de la Force.

L'homme ne peut, dans aucun but humain, créer du travail, mais il peut puiser ce travail dans la provision infinie de la nature, et en faire sa propriété.

Le ruisseau et le vent qui activent nos moulins ; le bois et la houille qui animent nos machines à vapeur et chauffent nos appartements, ne sont que les véhicules d'une partie de cette grande quantité de force dont

nous cherchons à nous emparer pour en diriger les effets suivant notre désir.

Le meunier réclame comme sa propriété la pesanteur de l'eau qui tombe, ou la force vive de l'air agité. C'est qu'en effet ces petites fractions de l'immense activité de la Nature, forment la plus grande partie de sa fortune.

Cependant, de ce qu'aucune minime portion de force ne peut s'anéantir, on ne peut conclure qu'elle ne puisse rester stérile pour l'usage de l'homme. A ce point de vue, W. Thomson a tiré de la loi de Carnot des conséquences importantes. Cette loi, que Carnot trouva en s'efforçant de chercher des relations entre la chaleur et le travail, n'appartient nullement aux conclusions nécessaires du Principe de la conservation de la Force ; mais Clausius l'a interprétée de façon à la rendre compatible avec ce principe général. Elle établit une dépendance entre la compressibilité, la capacité calorifique et la dilatation pour tous les corps. Si elle n'est pas encore entièrement prouvée par l'expérience, elle a acquis une grande vraisemblance par les corollaires importants qui en découlent et que des recherches ultérieures ont confirmés. On peut énoncer cette loi de la manière suivante, dépouillée de la forme mathématique présentée par Carnot : *La chaleur qui se transmet d'un corps chaud à un plus froid peut seule, et en partie seulement, être transformée en travail.*

La chaleur d'un corps, qui ne pourrait être refroidi, ne serait jamais réductible à une autre forme d'effet soit mécanique, soit électrique, soit chimique. Ainsi, dans nos machines à vapeur, une partie de la chaleur

du charbon incandescent se transforme en travail en passant dans l'eau moins chaude de la chaudière.

Mais si tous les corps de la nature possédaient tous une seule et même température, jamais la moindre portion de chaleur ne deviendrait du travail. Ainsi l'on peut faire deux parts de la provision totale de force universelle : l'une est composée de chaleur qui restera inaltérable ; l'autre, à laquelle appartiennent une partie de la chaleur des corps plus chauds, et tout le système des forces chimiques, mécaniques, électriques et magnétiques, est susceptible des métamorphoses les plus variées et contient tout le domaine des actions réciproques de la nature.

Mais la chaleur des corps plus chauds tend incessamment, par la conductibilité et le rayonnement, à se communiquer aux corps moins chauds et à établir l'équilibre de température.

Chaque mouvement des corps terrestres réduit en chaleur, par le choc et le frottement, une partie de la force mécanique ; une partie seulement de cette chaleur peut être employée de nouveau ; il en est de même dans tous les phénomènes chimiques et électriques. Il suit de là que le premier groupe de l'ensemble des forces naturelles, celui qui ne contient que de la chaleur inaltérable, prend sans cesse un nouvel accroissement aux dépens de chaque action naturelle ; et si l'univers est abandonné au cours de ses actions physiques, toute la provision des forces sera réduite en chaleur, et l'équilibre de la température sera général et définitif.

A ce moment, toute possibilité d'une nouvelle transformation deviendra impossible ; toutes les activités de la

nature seront arrêtées, fixées dans un repos absolu. La vie des plantes, de l'homme et des animaux sera naturellement éteinte, si le soleil a perdu le privilége de sa haute température et de sa lumière, et si les parties constituantes de la surface terrestre n'offrent plus aucune des réactions qu'exigent leurs forces d'affinité.

En un mot tout l'univers, à partir de cet instant, sera condamné à un repos éternel.

Cette conséquence de la loi de Carnot ne peut être admise, bien entendu, que pour autant que cette loi, par des preuves constantes, ait pris un caractère de vérité absolue et universelle. Toutefois, rien jusqu'aujourd'hui ne prouve le contraire. En tous cas, nous ne pouvons nous empêcher d'admirer la pénétration de Thomson qui, dans les termes d'une équation connue depuis longtemps, où il n'est question que de chaleur, de volume, de pression des corps, a su lire un arrêt qui menace l'univers d'une mort éternelle..... à la vérité, au bout d'un temps infiniment long.

Tel est le point élevé où nous nous trouvons conduits par un chemin hérissé de conceptions mécaniques et mathématiques, et d'où nous découvrons un horizon immense. Notre principe général nous permet de contempler le monde dans toutes les directions et de choisir celle qui nous intéresse le plus.

Les jeux de nos petits laboratoires de physique, de nos mesquines relations et de nos abstractions compliquées, sont bien loin d'offrir un intérêt comparable avec l'aspect immense de l'espace céleste, des nuages, des fleuves, des forêts, des créatures vivantes qui nous

entourent. Les mêmes lois qui régissent les corps terrestres dans les procédés physiques, étant applicables à tous les corps célestes, c'est la même force qui, sous le nom de Pesanteur, agit à la surface de la terre, et qui, sous le nom de Gravitation, règle les mouvements des corps célestes. Cette même force se reconnaît dans les mouvements des étoiles doubles, situées à des distances incommensurables, comme dans le mouvement de la lune autour de la terre. La lumière et la chaleur des corps terrestres ne diffèrent pas essentiellement, sous aucun rapport, de la chaleur et de la lumière du soleil et des étoiles fixes les plus éloignées; les pierres météoriques que lancent quelquefois sur notre globe les espaces célestes, ont la même composition élémentaire que nos minéraux. Il n'y a donc pas à hésiter pour considérer les lois générales auxquelles sont soumis tous les phénomènes terrestres, comme étant les mêmes auxquelles obéit tout l'univers. Jetons donc, appuyés sur notre grande loi, un coup d'œil sur l'économie de l'univers relativement à la provision de force disponible.

Un grand nombre de propriétés évidentes, appartenant à la disposition de notre système planétaire, tendent à démontrer qu'autrefois une masse continue de matière était animée d'un mouvement de rotation commun à tous ses points. Sans cette hypothèse on ne peut expliquer comment toutes les planètes circulent dans le même sens autour du soleil; comment toutes elles tournent dans le même sens autour de leur axe; comment leurs orbites et celles de leurs satellites ou de leurs anneaux sont toutes dans le même plan; comment

la forme de ces orbites diffère toujours un peu de celle du cercle, etc.

En se fondant sur les apparences qui restent de son état primitif, les astronomes ont adopté une hypothèse sur l'origine de notre monde, qui, tout en étant destinée à rester toujours à l'état d'hypothèse, est assez bien légitimée dans ses principaux traits par l'analogie pour mériter notre attention; d'autant plus que cette idée naquit dans notre patrie, dans les murs mêmes de la ville de Kœnigsberg.

Kant, contemplateur enthousiaste de la composition physique de la terre et de la structure du monde, avait entrepris l'étude des ouvrages de Newton : il prouva combien il en avait pénétré les idées fondamentales en émettant lui-même la féconde pensée que la même force d'attraction qui existe dans toute la matière pondérable, et qui entretient aujourd'hui le mouvement des planètes, pouvait bien avoir existé dans la matière disséminée en vapeur dans les espaces, et formé le système du monde.

Plus tard, de son côté, le célèbre auteur de la *Mécanique céleste*, Laplace, conçut la même idée et la propagea chez les astronomes.

Ainsi nous nous représentons à l'origine notre système planétaire avec son soleil, comme une grande masse nébuleuse remplissant tout l'espace où se trouve aujourd'hui notre système, jusqu'au delà des limites de l'orbite de la planète la plus éloignée, *Neptune*.

Aujourd'hui encore, dans les régions lointaines du firmament, nous apercevons peut-être des masses semblables de vapeur, sous forme de taches et d'étoiles nébuleuses; et même, au dedans des limites de notre

système, les comètes, la lumière zodiacale, la couronne du soleil dans les éclipses totales, semblent des restes de substance nébuleuse d'une densité si faible, qu'elle n'interrompt ni ne trouble même la lumière des étoiles, et la laisse parvenir jusqu'à nous.

En calculant la densité de la masse de notre système d'après l'hypothèse que, sous forme nébuleuse, elle remplissait tout l'espace jusqu'aux limites de la dernière planète, on trouve qu'un gramme de matière pondérable avait un volume de plusieurs milliards de mètres cubes.

La force attractive commune à toute la matière devait tendre à rapprocher ces masses entre elles et à les condenser ; la sphère nébuleuse devait se contracter peu à peu, et le mouvement de rotation primitivement lent dont on suppose l'existence, devait s'accélérer de plus en plus.

La force centrifuge qui avait le plus d'intensité dans le voisinage de l'équateur, devait arracher de temps en temps et lancer dans l'espace des masses de matière ; celles-ci se constituaient en globes isolés, ou bien se divisaient, comme le globe principal, en plusieurs sphères telles que les planètes à satellites, ou bien en sphères avec anneaux, jusqu'à ce qu'enfin la masse mère se soit condensée pour former le corps solaire. Cette idée grandiose n'expliquait pas l'origine de la chaleur et de la lumière.

Lorsque ce chaos nébuleux s'est séparé des autres masses d'étoiles fixes, il ne devait pas seulement contenir la totalité de la substance destinée à composer notre système, mais encore, d'après les nouveaux principes,

la totalité de force mécanique dont la provision était destinée à y fonder le domaine de l'activité.

La seule force d'attraction de toutes les parties entre elles constituait déjà un fonds considérable sous ce rapport. Cette force, qui se manifeste dans la pesanteur à la surface de la terre, n'est autre chose que la gravitation, ou la pesanteur universelle, qui se manifeste dans l'activité des corps célestes. La pesanteur terrestre, en faisant tomber un corps, exécute un travail et engendre de la force vive; il en est de même de la gravitation quand elle rapporche deux molécules qui se trouvent dans des régions éloignées de l'espace.

La force chimique, dans ces temps primitifs, devait aussi être prête à agir; mais comme elle n'entre en jeu que par le contact le plus intime de substances différentes, elle a dû être précédée d'une condensation générale.

Nous ne pouvons pas dire s'il existait en outre de la force sous forme de chaleur, au commencement de cette formation; mais la loi de l'équivalent de la chaleur et du travail nous permet de trouver, dans les forces mécaniques de cet état primitif, une source si riche de chaleur et de lumière, que nous n'avons pas besoin d'en rechercher une autre.

Si, par exemple, pendant la condensation des masses, leurs molécules s'entre-choquaient et se frottaient les unes contre les autres, la force vive de leur mouvement était anéantie et convertie en chaleur. Les anciennes théories avaient déjà supposé que le choc des masses cosmiques engendrait de la chaleur, mais elles étaient bien loin encore de juger, même approximativement,

l'excessive quantité de cette chaleur. Aujourd'hui nous pouvons la calculer avec exactitude.

En admettant l'hypothèse que la densité primitive de la matière nébuleuse était infiniment petite par rapport à la densité actuelle du soleil et des planètes, on calcule le travail dû à la condensation ; ensuite on détermine quelle portion de ce travail existe encore maintenant sous forme de force mécanique, telle que l'attraction des corps célestes, et la force vive de leurs mouvements : la différence a été transformée en chaleur.

Le résultat de ce calcul (1) est que nous ne possédons

---

(1) Voici comment s'exécute le calcul de l'échauffement causé par la condensation supposée des corps célestes de notre système, provenant d'une substance disséminée sous la forme de nébuleuse. Les autres calculs, dont nous donnons les résultats, sont dus en partie à *J. R. Mayer* et à *Joule*, et en partie tirés des faits et des méthodes connus de la science.

La mesure du travail produit par la condensation des masses primitivement dans un état de ténuité infinie, est le potentiel des masses condensées entre elles. Le potentiel V d'une sphère de densité uniforme, de masse M et de rayon R, en appelant m la masse de la terre, r son rayon, et g l'intensité de la pesanteur à la surface de la terre, est donné par l'équation

$$V = \frac{3}{5} \cdot \frac{r^2 M^2}{R m} g.$$

Tous les corps de notre système étant des sphères, le travail total de la force condensante est égal à la somme de leurs propres potentiels. Ces potentiels étant entre eux comme les quotients $\frac{M^2}{R}$, ils s'évanouissent tous devant le potentiel du soleil ; celui même de la plus grosse planète, de Jupiter, n'est que 0,00001 de celui du soleil ; le potentiel du soleil suffit donc dans le calcul.

Pour élever de t degrés la température d'une masse M, dont

plus que $\frac{1}{454}$ de la force originelle sous forme mécanique, et que le reste a été changé en chaleur : cette

---

le calorique spécifique est σ, il faut la quantité de chaleur $M\sigma t$; soit Ag l'équivalent mécanique de l'unité de chaleur, le travail correspondant à cette quantité de chaleur sera $Ag M\sigma t$.

Pour trouver, par la condensation de la masse solaire, l'élévation de température réalisée, posons :

$$Ag M\sigma t = V,$$

d'où

$$t = \frac{3}{5}\frac{r^2 M}{AR m\sigma}.$$

Pour une masse d'eau égale à la masse du soleil, on aurait $\sigma = 1$; et en mettant pour A, M, R, m et r les valeurs connues, on a :

$$t = 28611000^\circ \text{ centigr.}$$

La masse du soleil est 738 fois plus grande que celle de toutes les autres planètes ensemble ; si nous prenons la masse d'eau égale à celle de tout le système, nous aurons à multiplier t par $\frac{738}{739}$, ce qui ne change pas sensiblement sa valeur.

Lorsqu'une masse sphérique de rayon R_0 se contracte de plus en plus jusqu'au rayon R_1, l'élévation de température qui en résulte est

$$\theta = \frac{3}{5}\frac{r^2 M}{Am\sigma}\left\{\frac{1}{R_1} - \frac{1}{R_0}\right\},$$

ou bien

$$\frac{3}{5}\frac{r^2 M}{AR_1 m\sigma}\left\{1 - \frac{R_1}{R_0}\right\}.$$

Si la masse du système planétaire n'était pas au commencement une sphère de rayon infini, mais limité, par exemple, à l'orbite de Neptune, dont le rayon est 6000 fois celui du soleil, le rapport $\frac{R_1}{R_0} = \frac{1}{6000}$, et la température t serait à diminuer de $\frac{1}{6000}$ de sa valeur, ce qui est insignifiant.

chaleur serait capable d'élever de 28 millions de degré la température d'une masse d'eau égale à la masse totale du soleil et des planètes.

Une diminution de $\frac{1}{10000}$ du rayon solaire serait un travail équivalent à un échauffement de 2861 degrés dans une masse d'eau équivalente à la masse du soleil. Or, d'après Pouillet, il se perd chaque année une quantité de chaleur équivalente à 1 1/4 de degré dans cette même masse d'eau ; de sorte que la contraction de $\frac{1}{10000}$ du rayon solaire suffirait pour compenser la perte de 2289 années.

Il est probable que le soleil n'a pas une densité uniforme, mais qu'elle est plus grande au centre ; alors son potentiel et la quantité de chaleur correspondante seraient encore plus considérables.

Pour estimer les forces mécaniques encore disponibles, on peut négliger la force vive des rotations des corps célestes autour de leurs axes, cette force vive étant très-minime comparée aux autres quantités. La force vive des mouvements de translation autour du soleil, et le travail de l'attraction solaire pour une planète de masse μ, à une distance ρ du soleil, sera :

$$L = \frac{gr^2 M\mu}{m} \left\{ \frac{1}{R} - \frac{1}{2\rho} \right\}.$$

En négligeant $\frac{1}{2\rho}$ comme infiniment petit comparé à $\frac{1}{R}$, et en divisant par la valeur de V, on aura :

$$\frac{L}{V} = \frac{3}{3} \frac{\mu}{M} ;$$

or, la masse totale des planètes est $\frac{1}{738}$ de celle du soleil, de sorte que pour tout le système,

$$L = \frac{1}{433} V.$$

Or, on estime à 2000 degrés la plus haute température que nous pouvons produire à l'aide du chalumeau à oxygène, avec laquelle nous fondons et nous volatilisons le platine, et à laquelle ne résistent que peu de substances. Il n'y a pas à se faire une idée des effets que peut réaliser une température de 28 millions de degrés.

Si toute la masse de notre système était convertie en charbon et consumée, elle ne dégagerait que $\frac{1}{3500}$ de la chaleur de ces 28 millions de dégrés. Il est clair qu'un si grand développement de chaleur a dû être un obstacle à une prompte condensation des masses, et que, dès les premiers instants, il a fallu qu'une majeure partie fût dissipée par le rayonnement dans l'espace, pour que ces masses pussent se rassembler en corps agrégés comme le sont le soleil et les planètes ; on conçoit encore qu'au commencement de cette agrégation les parties constituantes ne formaient qu'un océan incandescent. Cette dernière conséquence est confirmée, pour notre globe, par les phénomènes géologiques ; pour les autres corps de notre système, par leur forme de sphère aplatie qui caractérise l'équilibre des masses fluides animées de rotation, c'est-à-dire que leur état originel général a été l'état fluide.

En disant que notre système solaire a perdu sans compensation une quantité incommensurable de chaleur, nous n'avons pas commis une inconséquence à l'égard de notre *Principe de la conservation de la Force ;* cette chaleur, perdue pour notre patrie solaire, ne l'est pas pour l'univers entier. Elle s'est échappée par rayonnement, et rayonne encore chaque jour dans les espaces

infinis : nous n'oserions dire si le milieu qui transmet les vibrations lumineuses et calorifiques a quelque part des limites contre lesquelles ces ondulations se réfléchissent et rebroussent chemin, ou bien si elles accomplissent leur voyage éternel dans l'infini.

Il est certain que notre système planétaire possède encore une quantité de force mécanique équivalente à une quantité prodigieuse de chaleur. Si notre globe était tout à coup arrêté, dans sa course autour du soleil, par un choc, il en sortirait autant de chaleur que pourrait en dégager une masse de charbon égale à quatorze fois la masse de la terre ; hâtons-nous de dire que dans la disposition actuelle des astres, ce choc n'est pas à redouter.

En admettant pour la terre la capacité calorifique la moins favorable, c'est-à-dire la plus forte, celle de l'eau, sa masse prendrait par suite de ce choc une température de 11200 degrés : la terre serait donc fondue entièrement, une grande partie serait même vaporisée.

La terre étant arrêtée tomberait nécessairement sur le soleil, et ce nouveau choc donnerait naissance encore à une quantité de chaleur 400 fois plus considérable.

Un phénomène semblable se manifeste encore de temps en temps sous nos yeux. Il n'est pas douteux que les étoiles filantes, les météores et les pierres météoriques sont des masses qui appartiennent à l'espace céleste, et qui, avant de parvenir dans le cercle de notre planète, circulaient autour du soleil comme toutes les autres planètes. Ces masses deviennent visibles en pénétrant dans notre atmosphère, et souvent se précipitent vers nous.

L'incandescence et la haute température que possèdent encore des aérolithes dans les premiers instants de leur chute, s'expliquent depuis longtemps par leur frottement dans l'air. En effet, une vitesse d'environ 1000 mètres par seconde suffirait pour porter à une température de 1000 degrés le fer météorique et le rendre lumineux, s'il absorbait seul toute la chaleur due au frottement.

Or, on attribue aux étoiles filantes une vitesse 30 à 50 fois plus grande. Mais il est vrai que la majeure partie de la chaleur dégagée se disperse dans la masse d'air traversée par le météore. Le sillage lumineux des étoiles filantes est sans doute formé de parties incandescentes détachées de leurs surfaces.

Les aérolithes qui tombent sur la terre éclatent quelquefois violemment ; cette explosion peut être causée par le changement brusque de température. La plupart des morceaux nouvellement tombés ont été trouvés très-chauds, mais non lumineux. On peut croire que la rapidité avec laquelle ils ont traversé la couche atmosphérique, n'a pas laissé à la chaleur le temps de pénétrer la masse entière, et qu'une faible épaisseur ayant été portée à l'incandescence, la lumière s'est promptement éteinte.

On peut donc considérer la chute des aérolithes comme le testament des phénomènes qui ont joué le rôle le plus important dans la formation des corps célestes, légué à la science actuelle pour la guider et la délivrer de l'incertitude des hypothèses.

Cependant l'idée de Kant et de Laplace, que les masses de notre système ont été d'abord dispersées dans l'espace

sous forme nébuleuse, est encore une hypothèse ; mais c'est l'unique.

Quant à la rareté de la chute des pierres météoriques, il faut remarquer la concordance qui continue à exister entre les données scientifiques, les vieilles traditions de l'humanité et les pressentiments de l'imagination des poëtes. Les cosmogonies des anciens peuples commencent toutes par le chaos et l'obscurité, comme Méphistophélès dit en parlant de lui-même :

« Je suis une partie de la partie qui autrefois était « tout ; une partie des ténèbres qui ont engendré la lu- « mière, l'orgueilleuse lumière qui maintenant dispute « à sa mère la nuit, son ancien rang et son do- « maine. »

Le récit mosaïque ne s'en écarte pas beaucoup non plus, si nous observons que le ciel de Moïse n'est pas le firmament ni la voûte azurée, mais signifie l'UNIVERS, et que la terre informe et les eaux de l'abîme qui plus tard ont été chassées les unes au-dessus du firmament, les autres en dessous, ne sont autre chose que la substance chaotique.

« Au commencement Dieu fit le ciel et la terre ; la « terre était sans forme et vide ; l'obscurité régnait sur « l'abîme, et l'Esprit de Dieu planait sur les eaux. Et « Dieu dit : *Que la lumière soit.* Et la lumière fut. »

Mais de même que dans les cosmogonies modernes la lumière de la masse nébuleuse et de la terre avec sa récente fluidité ignée, n'était pas encore partagée entre le soleil et les étoiles, le temps n'était pas encore divisé en jour et nuit, comme il arriva après le refroidissement de la terre.

« Dieu sépara la lumière de l'obscurité ; il nomma la « lumière *jour*, et l'obscurité *nuit*. Et le premier jour se « composa du soir et du matin. »

Seulement, après que les eaux se furent rassemblées dans l'Océan, et que les continents furent mis à sec, les plantes et les animaux purent vivre, car à eux seuls conviennent le jour et la nuit.

Notre terre porte encore les traces irréfutables de son ancien état igné. La couche granitique de ses montagnes montre une structure qui ne peut exister que par la solidification de masses fondues. Les observations de la température dans les mines et les trous de sonde montrent encore aujourd'hui que la chaleur croît avec la profondeur, et si l'accroissement est proportionnel à la distance, elle est capable de fondre toutes nos roches, à 75 kilomètres de la surface.

Nos volcans projettent encore de temps en temps de grandes masses de matière fondue, comme témoins de l'incandescence qui règne à l'intérieur.

La croûte refroidie de la terre est déjà devenue si épaisse, que, suivant le calcul de sa conductibilité, la chaleur provenant de l'intérieur est infiniment petite comparée à celle qui nous vient du soleil ; elle ne pourrait accroître que de $\frac{1}{30}$ de degré la température de la surface, de sorte que le reste de l'ancienne provision de force mise en réserve dans l'intérieur du globe, n'a presque plus d'influence sur les phénomènes superficiels, si ce n'est dans les irruptions volcaniques.

Les phénomènes que nous observons ont bien plutôt leur cause dans les autres corps célestes, notamment la

lumière et la chaleur du soleil, et même la force d'attraction du soleil et de la lune, comme le flux et le reflux.

Mais le domaine le plus riche consiste dans les changements que nous devons à la chaleur et à la lumière du soleil. Cet astre échauffe notre atmosphère inégalement : l'air le plus échauffé et dilaté s'élève pendant que tout autour s'abaissent des courants d'air froid : telle est l'origine des vents. Cette cause a son centre le plus énergique à l'équateur, dont l'air échauffé et élevé jusqu'aux limites de l'épaisseur atmosphérique, s'écoule constamment vers les pôles, tandis que, rasant la surface de la terre, les vents alizés ramènent l'air frais à l'équateur. Sans la chaleur du soleil, tous les vents cesseraient.

Des courants analogues existent par la même raison sur l'Océan : ces courants ont une influence considérable sur le climat de bien des contrées. Les uns amènent les eaux chaudes de la mer des Antilles vers les Iles Britanniques, et y entretiennent une chaleur modérée avec une féconde humidité; tandis que d'autres, charriant les glaces du pôle Nord jusqu'à Terre-Neuve, y répandent l'âpreté du froid.

Une grande quantité d'eau évaporée par la chaleur du soleil monte dans les couches élevées de l'air, se résout en brouillard et forme les nuages, puis retombe en pluie ou en neige sur le sol et sur les montagnes, où elle se rassemble en sources, en ruisseaux et en fleuves, pour retourner enfin à la mer, après avoir rongé les rochers et charrié un limon qui apporte sa part de changement à la constitution géologique, et après avoir en outre activé des moulins.

En supprimant la chaleur du soleil, il ne resterait plus sur la terre qu'un seul mouvement, celui du flux et du reflux de la mer dû à l'attraction du soleil et de la terre.

Examinons maintenant les mouvements et le travail des êtres organisés. Pour les constructeurs d'automates du siècle précédent, l'homme et les animaux n'étaient que des horloges qui n'avaient jamais besoin d'être remontées, et dont la force motrice venait de rien; ces mécaniciens n'avaient pas encore trouvé le rapport qui existe entre la nourriture et la production de force.

Depuis que nous avons reconnu la vraie source du travail recueilli dans la machine à vapeur, nous pouvons nous demander si cela se passe de même chez l'homme.

En réalité, la continuation de la vie est subordonnée à l'absorption continuelle des aliments : ceux-ci consistent en substances combustibles; on sait qu'après avoir été complétement digérées, elles sont introduites dans le sang et soumises à une combustion lente dans les poumons; et qu'enfin elles réagissent avec l'oxygène de l'air d'une façon à peu près analogue à la combustion qui a lieu dans nos foyers.

Or, la quantité de chaleur produite est indépendante de la durée de la combustion et des degrés intermédiaires par lesquels elle s'accomplit; la quantité d'aliment absorbé permet de calculer la quantité de chaleur produite, et par conséquent le travail disponible dans le corps d'un animal.

Malheureusement les vérifications expérimentales sont

encore difficiles à faire ; mais, dans les limites d'approximation qu'il est possible d'atteindre, il est démontré que la chaleur engendrée chez les animaux correspond à celle de l'action chimique. Le corps des animaux diffère donc d'une machine à vapeur, non point par le procédé qui donne naissance à la chaleur et au travail, mais bien par la manière d'approprier cette force à son but spécial.

Dans le choix de son combustible, l'animal est plus limité que la machine à vapeur. Assurément on pourrait alimenter celle-ci aussi bien avec du sucre, de la pâte, du beurre, qu'avec de la houille et du bois ; la machine animale est obligée de choisir plus délicatement son combustible, pour le distribuer à tout son organisme ; elle est obligée de renouveler sans cesse la substance fragile de ses organes ; et comme elle ne peut pas la créer, elle est bien obligée de la prendre au dehors.

Liebig est le premier qui a observé ces différences essentielles dans la définition de l'alimentation. Le renouvellement du corps paraît se constituer de substances albumineuses qui proviennent des plantes et qui forment la plus grande partie du corps des animaux. Elles ne forment qu'une petite partie de la nourriture journalière ; le reste, tel que le sucre, la farine, la graisse, n'est que du combustible. Sans doute ce combustible ne pourrait être remplacé par de la houille, à cause de l'insolubilité de cette dernière.

Si les phénomènes de la vie animale ne diffèrent pas des phénomènes inorganiques, d'où provient cette nourriture qui est la source de sa force? Elle vient du

règne végétal. En effet, la seule nourriture possible vient du règne végétal, ou des animaux se nourrissant eux-mêmes du règne végétal, les herbivores. Ceux-ci sont l'intermédiaire qui élabore la nourriture des carnivores, parmi lesquels il faut ranger l'homme. Oui, les herbivores sont le laboratoire où se prépare notre nourriture tirée des plantes que nous ne pourrions digérer directement.

Le foin et l'herbe contiennent essentiellement les mêmes éléments nutritifs que la farine, mais en plus petite quantité. Les organes digestifs de l'homme ne sont pas capables de séparer la faible quantité de matière utile de la grande masse insoluble que contiennent ces végétaux ; c'est pourquoi nous soumettons en premier lieu le foin et l'herbe aux puissants estomacs des animaux herbivores. Ces êtres sont pour nous de grands réservoirs de nourriture où nous la puisons sous une forme plus agréable et plus utile.

Mais d'où vient la nourriture du règne végétal ? En recherchant ce que les plantes absorbent et dégagent, on trouve que leur principale alimentation consiste dans les produits de la combustion opérée par les animaux. En effet, elles puisent dans l'air le carbone consumé par la respiration sous forme d'acide carbonique ; dans l'eau, l'hydrogène ; dans l'ammoniac, l'azote ; ces éléments principaux, adjoints à un petit nombre d'autres qui sont repandus dans le sol, servent à recomposer les corps combustibles qui, sous les noms d'albumine, de sucre, d'huile, entretiennent la vie animale.

Voilà donc un cercle qui semble une source éternelle de force ! car les plantes préparent le combustible et la

nourriture ; les animaux s'en servent, les consument lentement dans leurs poumons, et restituent aux plantes les produits de cette combustion. Le végétal est la source éternelle des forces chimiques ; l'animal, la source éternelle de force mécanique. La réunion de ces deux grandes classes d'êtres serait-elle la base du Mouvement Perpétuel ?

Ne nous hâtons pas trop de répondre ; car il est certain que la végétation ne transforme les produits de la combustion en nouveau combustible que sous l'influence de la lumière solaire. Une partie de cette lumière se distingue par une grande activité chimique ; elle peut faire et défaire certaines combinaisons. Les rayons qui jouissent de cette propriété au plus haut degré sont les bleus et les violets ; on les appelle *rayons chimiques*. Ils ont la plus grande part aux résultats que l'on obtient dans la photographie, en décomposant les combinaisons d'argent.

Ces mêmes rayons surmontent dans les feuilles vertes la puissante affinité des éléments de l'acide carbonique ; en tirent l'oxygène qui rentre dans l'atmosphère, et retiennent dans la plante le carbone avec d'autres substances qui forment le ligneux, l'amidon, l'huile ou la gomme. Les rayons chimiques disparaissent dès qu'ils rencontrent les parties vertes des plantes ; c'est pourquoi dans les images daguerriennes les objets verts, les feuilles par exemple, sont toujours reproduits en noir. La lumière réfléchie par ces couleurs ne contient plus les rayons qui agissent sur les combinaisons de l'argent.

Il faut donc conclure de là que l'accumulation de

substance combustible dans les plantes correspond à une destruction de force active venant du soleil; on peut présumer avec beaucoup de vraisemblance que cette force est la source de la puissance chimique des combustibles.

Cependant aucune expérience ne permet de déterminer un rapport entre la force vive des rayons détruits et la quantité de force chimique accumulée dans les plantes; tant que ce rapport nous manque, nous ne pouvons encore présenter notre conjecture avec un caractère de certitude.

Si cette prévision se vérifie, il en sortira pour nous ce résultat flatteur, que toute force à laquelle nous devons notre vie et nos mouvements nous vient uniquement du soleil : nous pouvons donc tous prétendre à la même noblesse que l'empereur de la Chine qui se dit fils du Soleil. Mais il faut ajouter que cette origine magnifique n'appartient pas à nous seuls, car les créatures les plus inférieures, telles que le crapaud et la sangsue, en jouissent également, ainsi que tout le règne végétal et même le combustible, le plus ancien comme le plus nouvellement formé, qui alimente nos foyers et nos machines.

Ainsi le vaste ensemble de phénomènes météorologiques, climatériques, géologiques et organiques qui se renouvelle constamment sur notre globe est causé et entretenu par la lumière et la chaleur du soleil ; c'est là un exemple frappant de l'activité protéique d'une seule cause dans les innombrables circonstances spéciales de la nature.

La terre est encore l'objet d'une autre influence de

son astre central, et de son satellite la lune, qui se manifeste dans le mouvement du flux et du reflux de la mer. Chacun de ces astres soulève par son attraction deux ondes colossales qui parcourent l'Océan dans une direction qui semble parallèle à celle des astres eux-mêmes. Les deux ondes de la lune, à cause de sa proximité, sont environ 3 fois et demi aussi grandes que celles du soleil : l'une a son point culminant dans le quart de la sphère terrestre qui est directement éclairé par la lune ; et l'autre dans le quart diamétralement opposé. Ces deux quarts de la surface de la terre ont donc le flux; les deux quarts interposés ont le reflux.

Sur la pleine mer la hauteur du flux n'atteint qu'à peine un mètre ; ce n'est que dans les détroits et les canaux resserrés, où l'eau éprouve une forte pression, qu'elle monte jusqu'à près de dix mètres : malgré cela, la puissance du phénomène est telle que le flux amène dans la région qu'il occupe un volume d'eau de 420 kilomètres cubes de plus qu'elle n'en possède pendant le reflux : cette différence énorme doit s'écouler en 6 heures d'un quart de sphère dans l'autre.

Le phénomène du flux et du reflux, comme Mayer l'a déjà remarqué, étant lié à la loi de la conservation de la force, offre une remarquable relation avec la question de la stabilité de notre système planétaire.

La théorie de Newton nous apprend qu'un corps solide, placé dans l'espace vide absolu, et attiré par le soleil, doit se mouvoir autour de lui comme les planètes, et conserver son mouvement de toute éternité.

Or, nous n'avons pas seulement une planète qui se meut autour du soleil, mais un grand nombre qui,

par leurs attractions réciproques, éprouvent de légères perturbations dans leurs trajectoires. Laplace, dans sa *Mécanique céleste*, a démontré que dans notre système planétaire ces perturbations sont périodiques, croissent et décroissent sans sortir de certaines limites, et que par conséquent la stabilité du système est assurée pour l'éternité.

Mais cette démonstration repose sur les deux hypothèses que l'espace planétaire est absolument vide, et que le soleil et les planètes sont des corps solides.

Quant à la première, elle est admise, parce que les observations astronomiques ne sont point parvenues à observer dans la marche des planètes des modifications qui trahiraient la présence possible d'un milieu résistant.

Mais il existe un corps céleste plus petit, de masse moindre, la comète d'Enke, qui présente des perturbations telles que ses trajectoires elliptiques se resserrent toujours davantage autour du soleil. Ce mode de mouvement correspond sans aucun doute à celui qui résulterait de l'action d'un milieu résistant ; et si ce milieu est la vraie cause de ce rapprochement, il viendra un temps où la comète ira se précipiter sur le soleil ; et toutes les planètes sont menacées d'une chute semblable, après un nombre incalculable de siècles (1).

Mais quand même l'existence d'un milieu résistant serait douteuse, il n'est pas possible d'assurer que toutes les planètes sont des corps solides, de structure invariable. Le soleil, Vénus, Mars, Jupiter et Saturne ont des atmosphères ; Mars a des eaux et de la glace ; quant à la

(1) L'opinion d'un milieu résistant a été refutée par M. Faye. Comptes rendus par l'Acad. des sciences de Paris, t. XLVII et suiv.

terre, nous ne pouvons douter de sa fluidité extérieure, et sa fluidité intérieure est peut-être encore plus grande.

Les mouvements du flux et du reflux de la mer, ceux de l'atmosphère, sont accompagnés de frottement; le frottement détruit de la force vive, et cette perte ne peut affecter que la force vive des mouvements planétaires. La conséquence inévitable de ces faits, c'est que chaque flux et reflux consomme avec une lenteur infinie, mais aussi avec certitude, une partie de la provision de force mécanique du système, et par suite la rotation de la planète doit se ralentir : cette planète, ainsi que son satellite, doit donc se rapprocher du soleil.

On ne pourrait encore évaluer le temps qui s'écoulera jusqu'à ce que la durée de notre jour soit réduite d'une seconde, tant que la hauteur et la durée du flux ne seront pas connues pour chaque point de l'Océan.

Mais ce changement s'effectue avec une lenteur extraordinaire ; les résultats des calculs de Laplace, d'après les observations d'Hipparque, ne donnent pas une réduction de $\frac{1}{300}$ de seconde sur la durée du jour, pour une période de 2000 ans. Le résultat final n'aurait lieu qu'après des millions d'années, si avant cela les eaux de la mer n'étaient pas solidifiées, quand même la terre présenterait toujours la même moitié au soleil, tandis que l'autre serait toujours plongée dans l'ombre.

C'est ainsi que la lune se présente par rapport à la terre, comme d'autres satellites par rapport à leurs planètes : ils doivent peut-être cette situation à la grande violence du flux et du reflux de leurs masses au temps de leur fluidité ignée.

Il n'y aurait aucune opportunité à évoquer ces résultats qui, appartiennent aux lointains les plus reculés de l'avenir, si ces résultats n'étaient pas inséparables de leurs prémisses. Les lois de la mécanique physique sont les télescopes de notre intelligence, qui nous permettent de voir clair dans la nuit la plus sombre du passé et de l'avenir.

Une autre question importante qui se présente pour l'avenir de notre système planétaire, est relative à sa température et à sa lumière. La chaleur intérieure de notre globe ayant peu d'influence sur la température superficielle, celle-ci dépend uniquement du rayonnement solaire. Pouillet a mesuré la quantité de chaleur déversée par ce rayonnement dans un temps donné, sur un espace déterminé. Cette quantité équivaut par heure à celle que fournirait la combustion d'une couche de charbon de trois mètres d'épaisseur, appliquée sur la croûte terrestre, c'est-à-dire, en un an, une épaisseur de 26 kilomètres.

Si cette chaleur devait être retirée uniformément de l'astre, sa température s'abaisserait de 1/3 degré par an, en supposant sa capacité calorifique égale à celle de l'eau.

Ces chiffres nous permettent de comparer la grandeur de l'émission à la surface et au volume de l'astre. Mais ils ne nous apprennent pas si le soleil rayonne, comme un corps lumineux, la chaleur qui est accumulée en lui depuis sa naissance, ou bien si une action chimique renouvelle constamment la chaleur de sa surface.

Il est vrai que, d'après notre principe de la *Conservation de la Force*, aucun procédé analogue à ceux que

nous connaissons sur la terre, ne peut entretenir dans le soleil un rayonnement inépuisable de chaleur et de lumière pendant un temps infini. Le même principe dit aussi que les provisions de force qui existent déjà à l'état de chaleur, ou qui peuvent encore être converties en chaleur, ne pourront être consommées qu'après un temps incommensurable.

Quant aux provisions de forces chimiques disponibles dans le soleil, nous ne pouvons rien conjecturer ; celles de forces calorifiques ne pourraient être évaluées qu'au moyen de données très-incertaines. Mais en adoptant les vues les plus vraisemblables, la densité extrêmement faible attribuée par les astronomes à un astre d'une si grande masse, à cause de sa haute température, devrait augmenter avec le temps : alors on peut calculer que si le diamètre du soleil se raccourcissait d'un dix-millième de sa grandeur actuelle, il en résulterait un échauffement suffisant pour compenser le rayonnement de vingt-un siècles. Or, les observations astronomiques les plus délicates auraient grand'peine à constater une telle diminution du diamètre solaire.

Quoi qu'il en soit, la température de la terre n'a pas diminué d'une manière sensible depuis les temps historiques, c'est-à-dire depuis 4000 ans. Bien que nous n'ayons pas de registres thermométriques de l'antiquité, nous pouvons déduire la stabilité des climats, de faits relatifs à la géographie des plantes : la vigne, l'olivier, sont très-sensibles aux changements de la température moyenne de l'année. Or, ces végétaux continuent à vivre dans les mêmes contrées qu'au temps d'Abraham et d'Homère, ce qui prouve que la température

moyenne annuelle de ces contrées n'a pas changé.

On oppose à cette conjecture le fait suivant : les chevaliers allemands auraient autrefois récolté et bu du vin cultivé en Prusse, ce qui n'est plus possible aujourd'hui. On en conclut que la chaleur de ce climat a diminué.

Mais, d'un autre côté, Dove a lu dans les anciens chroniqueurs que, dans certaines années exceptionnelles, le vin de Prusse avait été un peu moins aigre que d'habitude ; de sorte que l'histoire des chevaliers allemands servirait plutôt à apprécier la sensibilité de leur gosier que la température de leur pays.

Si les immenses provisions de force de notre système planétaire sont telles que le rayonnement continuel n'a pu les diminuer d'une quantité sensible depuis les temps historiques ; s'il est impossible de calculer le temps qui doit encore s'écouler avant que cette diminution soit observable et apporte un changement visible dans l'équilibre du système solaire, il n'en est pas moins vrai que, suivant les lois immuables de la mécanique, ces provisions de forces ne peuvent jamais éprouver que des pertes et non des augmentations, et doivent finir par s'épuiser.

Faut-il nous en effrayer ? L'homme mesure la grandeur et la sagesse de l'Univers à la durée et au bien-être promis à sa race ; mais l'histoire du passé de notre globe montre que l'existence de la race humaine n'est qu'un moment imperceptible dans la durée de ce passé. Un vase d'argile du Vandale, un glaive du Romain, tout ce que nous retrouvons dans le sol nous représente une antiquité reculée ; les restes de l'Égypte

et de l'Assyrie, conservés dans les Musées de l'Europe, sollicitent notre admiration silencieuse, et quelquefois il nous arrive de douter des témoignages de ces époques si éloignées de nous! Cependant, avant que la race humaine ait pu élever les Pyramides et Ninive, elle doit avoir pu vivre et se multiplier pendant des milliers d'années.

On porte à 6000 ans l'âge de l'humanité : combien ce chiffre est petit auprès des siècles pendant lesquels ont vécu ces longues séries de plantes luxuriantes et d'animaux gigantesques, morts avant l'apparition de l'homme; des siècles qui ont vu verdir le succin distillant sur la terre et dans la mer sa précieuse gomme ; qui ont vu la Sibérie, l'Europe et le Nord de l'Amérique couvertes de forêts de palmiers, habitées par les crocodiles et plus tard par les éléphants, dont les restes sont enfouis sous nos pieds ! Plus d'un géologue a cherché à évaluer la durée de ces périodes au moyen de différents points de repère : leurs résultats sont compris entre un et neuf millions d'années.

Et cependant le temps pendant lequel la terre a produit des êtres vivants est encore bien petit, comparé au temps pendant lequel ce n'était qu'un globe de pierre fondue. Son refroidissement depuis 2000 jusqu'à 200 degrés n'aurait pas exigé moins de 350 millions d'années, si l'on prend pour base les expériences de Bischof sur le refroidissement du basalte fondu.

Quant au temps où notre globe nébuleux s'est condensé et distribué dans l'espace planétaire, il impose silence à nos conjectures les plus hardies.

Ainsi l'histoire de notre orgueilleuse humanité n'est

qu'une petite ride dans l'océan des temps. L'état actuel de la nature inorganique paraît assuré pour des séries de siècles beaucoup plus longues que notre race n'a encore existé, de sorte que nous n'avons rien à craindre ni pour nous, ni pour une longue suite de générations après nous.

Mais les mêmes forces de l'air, de l'eau, des volcans, qui ont causé les anciennes révolutions géologiques, et qui ont enfoui de nombreuses existences les unes après les autres, ces mêmes forces agissent encore. Elles pourraient fort bien amener le dernier jour de la race humaine avant l'arrivée des changements cosmiques dont nous avons parlé ; elles pourraient nous forcer à céder la place à des créatures plus parfaites, comme nous avons pris celle du mamouth et du crocodile.

Ainsi le même fil que les rêveurs du Mouvement Perpétuel ont commencé à filer dans l'obscurité, nous a conduit à un principe universel, qui illumine jusqu'au fond l'abîme où se cachaient le commencement et le dénoûment de l'histoire de l'univers. Il montre à notre race une longue durée, mais non l'éternité ; il nous avertit d'un jour fatal, le jour du jugement ; mais heureusement il conserve le secret de sa date. La race entière, aussi bien que chaque individu, doit apprendre à supporter la pensée de sa mort ; toutefois notre race a, sur les créatures qui nous ont précédés, l'avantage d'une mission morale plus élevée qu'elle doit supporter et accomplir pour parvenir à sa destinée.

DE LA

CONSERVATION DE LA FORCE

INTRODUCTION

L'objet principal de cette dissertation la désigne surtout à l'attention des physiciens. C'est pourquoi l'auteur a tenu à s'abstenir de tout raisonnement philosophique : il a formulé ses principes sous la forme d'une hypothèse purement physique, dont les conséquences seront ensuite comparées aux lois expérimentales des divers phénomènes qui composent les différents groupes de la physique.

Deux idées peuvent être prises pour points de départ de ces principes : la première, c'est l'*impossibilité d'accumuler indéfiniment du travail par les effets d'une combinaison quelconque de corps*. La seconde, c'est la *possibilité de ramener toutes les actions de la nature à des forces attractives et répulsives dont l'intensité ne dépend que de la distance des points qui agissent les uns sur les autres.*

Ces deux idées sont identiques, comme on le verra au commencement de ce travail. Dans cette introduction nous montrerons leur portée essentielle dans l'œuvre spéciale et finale des sciences physiques. En effet, ces sciences ont pour but de découvrir les lois d'après lesquelles les faits particuliers de la nature sont liés à des *règles générales :* ces règles étant connues, permettent à leur tour, de déterminer tous les faits particuliers.

Ces règles, telles que la loi de la *Réfraction* ou de la *Réflexion* de la lumière, celles de *Mariotte* et de *Gay-Lussac*, relatives au volume des gaz, etc., ne sont évidemment que des conceptions générales qui embrassent un ensemble de phénomènes.

La recherche de ces règles appartient à la science expérimentale, tandis que la science théorique étudie les causes inconnues à l'aide des actions sensibles, et cherche à les saisir suivant la loi de la causalité. Ces études sont justifiées et imposées par cet axiome : *Tout changement dans la nature est dû à une cause suffisante.*

Les causes les plus prochaines que nous attribuons aux phénomènes de la nature, peuvent être *invariables* ou *variables*. Si elles sont variables, le même axiome nous conduit à chercher de nouveau les causes de cette variation, et ainsi de suite, jusqu'à ce que nous arrivions à une dernière cause agissant suivant une loi fixe, c'est-à-dire, produisant à chaque instant et dans les mêmes circonstances, le même effet.

Le but final des sciences théoriques est donc de

trouver les causes constantes des phénomènes. Il ne s'agit pas ici de décider si réellement tous les faits peuvent se ramener à de telles causes ; c'est-à-dire, si la nature est toujours intelligible, ou bien si elle présente des variations qui, se dérobant à la loi d'une causalité nécessaire, appartiennent au domaine de la spontanéité, de la liberté. Mais, on peut l'affirmer, la science qui a pour but de concevoir la nature, *doit admettre la possibilité de cette conception ;* et elle doit, en suite de son hypothèse, poursuivre son œuvre, ne fût-ce que pour acquérir la certitude irrécusable que nos connaissances sont limitées.

La science considère les objets du monde extérieur sous deux points de vue distincts. D'abord elle considère leur *Existence*, à l'exclusion de toute action quelconque sur d'autres objets ou sur nos organes; alors elle les désigne sous le nom de MATIÈRE.

L'existence de la matière est donc en elle-même sans activité ; nous y reconnaissons la propriété de l'*Étendue*, et *la Quantité* ou *Masse*, qui est éternellement invariable.

Les différences qualitatives ne peuvent être attribuées à la matière en elle-même ; car, dès qu'il s'agit de différentes matières, leurs différences résident dans leurs actions, c'est-à-dire dans leurs *Forces*. La matière en elle-même n'éprouve d'autre changement que celui de la position *dans l'espace*, c'est-à-dire *le mouvement*.

Mais rien dans la nature n'est sans activité. Nous n'avons la connaissance des objets que par leur in-

fluence sur nos organes. Les effets nous conduisent à la cause ou à l'*agent*.

Il s'ensuit que, pour appliquer la conception de la matière, il faut ajouter au premier point de vue, un second dont il a été fait abstraction jusqu'ici : c'est la faculté d'agir, ou la force.

Il est certain que les idées de matière et de force sont réellement inséparables. La matière pure serait indifférente à tout le reste du monde, puisqu'elle ne modifierait aucun objet voisin et n'affecterait pas non plus nos organes ; et si la force pure existait, elle ne serait que ce que nous avons déjà nommé matière.

C'est donc un contre-sens de considérer la matière comme réelle, et la force comme une simple conception : la matière et la force sont plutôt deux attributs de la réalité, deux abstractions formées par le même procédé intellectuel. Nous ne connaissons et ne pouvons connaître que la matière active.

Nous avons vu que les phénomènes naturels doivent être attribués à des causes dernières invariables; c'est-à-dire que les causes finales sont des forces qui ne varient pas dans le temps.

On a nommé élément chimique, toute matière douée de forces invariables (de qualité inaltérable). Imaginons l'univers divisé en éléments de qualité constante : les seuls changements possibles d'un tel système sont des changements de position dans l'Espace, c'est-à-dire des mouvements ; les rapports extérieurs par lesquels l'effet des forces est modifié,

sont uniquement des rapports d'étendue ou de position ; les forces ne sont que motrices, et leur effet ne dépend que de ces mêmes rapports, de sorte qu'en définitive *les phénomènes de la nature se réduisent à des mouvements de la matière causés par des forces motrices constantes, qui ne dépendent que de rapports de position dans l'Espace.*

Le mouvement est une modification des rapports d'étendue ou de position. Ces rapports ne peuvent être définis que dans des espaces limités, et non pas dans l'espace vide et dépourvu de points de repère.

Un mouvement ne peut donc être observé expérimentalement que par le changement des rapports de position d'au moins deux corps. Ainsi la force motrice, cause de ce mouvement, ne peut exprimer que le rapport mutuel d'au moins deux corps, et sa définition sera la *tendance de deux masses à modifier leur position réciproque.*

Mais la force avec laquelle deux masses se sollicitent mutuellement doit pouvoir être décomposée en forces élémentaires, émanant de toutes les parties de ces masses ; la mécanique poursuit cette décomposition jusqu'aux forces des points matériels, c'est-à-dire des points de l'espace occupés par de la matière.

Or, des points n'ont d'autre rapport de position que celui *de la distance ;* car la direction de leur ligne de réunion ne peut être déterminée qu'à l'aide d'au moins deux autres points. Donc la force motrice réciproque de deux points matériels ne peut

changer que leur distance : c'est-à-dire que *cette force ne peut être qu'attractive ou répulsive.*

Cela résulte immédiatement de l'axiome de la cause suffisante. La force avec laquelle deux masses se sollicitent doit nécessairement être définie par son intensité et par sa direction, pour autant que la position des masses est toujours connue.

Or, la seule direction que deux points puissent nous faire connaître, c'est la ligne droite qui les joint : donc *la force réciproque de deux points est toujours dirigée suivant cette droite, et son intensité ne dépend que de leur distance.*

Enfin le problème des sciences physiques consiste à ramener *tous les phénomènes naturels à des forces invariables, attractives et répulsives, dont l'intensité dépend de la distance des centres d'action.*

La possibilité de comprendre parfaitement la nature est subordonnée à la solution de ce problème.

La mécanique analytique n'a pas encore réduit à cette limite la notion de la force motrice : d'abord parce qu'elle n'a pas établi clairement la base fondamentale de ses principes ; ensuite parce qu'il lui importe de pouvoir calculer les effets de forces composées, dans certains cas où elle n'a pas encore à les diviser en forces élémentaires simples.

Cependant la plupart de ses principes généraux ne sont applicables au mouvement de systèmes matériels composés que dans le cas où ces systèmes agissent par le moyen de *forces attractives ou répulsives invariables.* Tels sont : le principe des vitesses virtuelles ; celui de la conservation du mouvement du

centre de gravité ; du plan principal de rotation et du mouvement de rotation des systèmes libres ; celui de la conservation de la force vive.

Dans les applications terrestres, on ne fait usage que du premier et du dernier de ces principes : les autres ne se rapportent qu'à des systèmes entièrement libres. Nous démontrerons que le premier n'est qu'une forme particulière du dernier : celui-ci, c'est-à-dire le principe de la *Conservation de la force vive*, est donc le résultat le plus général et le plus important de notre dissertation.

La science théorique, à moins de s'arrêter à mi-chemin, doit donc mettre ses vues en harmonie avec le principe présenté sur la nature des forces élémentaires et les conséquences de ce principe. Sa mission sera achevée lorsqu'elle aura défini tous les phénomènes au moyen de forces élémentaires, et démontré que cette définition est la seule possible et compatible avec les faits. Une telle définition serait considérée comme la forme nécessaire de la conception de la nature, et l'on pourrait lui donner le titre de *Vérité objective*.

I

PRINCIPE DE LA CONSERVATION DE LA FORCE VIVE

Nous admettons l'*Impossibilité de créer de rien une force motrice durable par une combinaison quelconque de corps.*

Ce principe a déjà servi à Carnot et Clapeyron pour démontrer théoriquement une série de lois, les unes déjà connues, les autres non encore confirmées par l'expérience, sur la chaleur latente et spécifique des corps les plus différents de la nature.

Dans ce travail, on se propose d'appliquer également le même principe à toutes les branches de la physique ; et non-seulement de démontrer sa concordance avec tous les faits dont les lois sont suffisamment certaines, mais encore de l'employer à découvrir les lois de phénomènes encore douteux, en s'appuyant sur les nombreuses analogies de faits mieux connus, et d'offrir ainsi un guide salutaire au procédé expérimental.

Pour donner l'idée précise de ce principe employons la considération suivante. Imaginons un système de corps, ayant entre eux certaines relations de distance ; que ces corps sollicités par leurs forces réciproques, se meuvent jusqu'à ce qu'ils occupent certaines autres positions déterminées. Il est permis alors de regarder leurs

vitesses acquises comme un certain travail mécanique ; et par conséquent de transformer ces vitesses acquises en travail, c'est-à-dire d'appliquer ces vitesses acquises pour produire un travail.

Pour obtenir une seconde fois l'effet de ces mêmes forces, en d'autres termes, pour gagner une seconde fois le même travail, il faut, par un moyen quelconque, replacer tous les corps du système dans leurs conditions primitives ; par exemple en y appliquant d'autres forces disponibles. Ainsi, on détruira pour cela une certaine partie du premier travail gagné.

Or, il résulte de notre principe que *le travail créé* d'abord, lorsque les corps du système passent de leur première position à la seconde, *est égal au travail détruit* ensuite, lorsqu'ils passent de la seconde à la première, quels que puissent être le moyen employé, le chemin suivi, et la vitesse avec laquelle se sont effectués les deux changements de position.

En effet, si un chemin quelconque correspondait à un travail supérieur à celui d'un autre chemin, on utiliserait le premier pour la *production* du travail, et le second pour la *dépense*. On pourrait donc immédiatement tirer profit de l'excès de travail et gagner indéfiniment de la force mécanique ; on aurait ainsi un *perpetuum mobile*, qui non-seulement se maintiendrait en mouvement, mais serait encore capable de développer extérieurement de la force.

L'expression mathématique du principe invoqué est la *Loi de la conservation de la force vive.*

La quantité de travail gagnée et dépensée est exprimée par la formule connue mgh, dans laquelle on dé-

signe par h la hauteur à laquelle s'élève le poids désigné par mg, g étant l'intensité de la gravité.

La vitesse qu'il faut imprimer à un corps pour lui faire atteindre la hauteur verticale h, est $v = \sqrt{2gh}$. Il reprend cette même vitesse en tombant, après avoir parcouru la même distance verticale h.

On aura alors

$$mgh = \frac{1}{2} mv^2.$$

En mécanique, le produit mv^2 est appelé *Quantité de force vive :* de sorte que la moitié de la force vive peut servir à exprimer ou à mesurer la quantité de travail.

Pour nous conformer davantage avec la manière actuelle de mesurer l'intensité des forces, nous appellerons ici *Quantité de force vive* le produit $\frac{1}{2} mv^2$; nous dirons alors que *la Force vive est égale au Travail*. Au point de vue de l'usage restreint que l'on a fait jusqu'ici du terme Force vive, cette modification a peu d'importance (1); mais elle aura pour nous de grands avantages.

Le principe de la conservation de la force vive s'énonce ainsi :

Quand un nombre quelconque de points matériels mobiles se meut sous l'unique influence de leurs forces réciproques, ou de forces émanant de centres fixes, la somme de toutes leurs forces vives est la même chaque

(1) Ceci était écrit avant que les importants travaux de Hamilton et de Jacobi fussent connus : ces savants ont adopté la même mesure de la Force vive, et ont étendu l'application de cette quantité.

fois que ces points matériels reviennent dans leurs premières positions relatives, ou dans leurs premières positions relativement aux centres fixes; quelles que soient, dans l'intervalle, leurs trajectoires et leurs vitesses.

Si les forces vives étaient dépensées pour élever à certaines hauteurs quelques parties du système, ou des masses équivalentes à ces parties, les quantités de travail gagnées de cette manière seraient donc égales dans les mêmes circonstances.

Mais ce principe ne s'applique pas à toutes les forces. En mécanique, il est ordinairement lié au principe des vitesses virtuelles : or, celui-ci n'est démontré que pour des points matériels sollicités par des forces attractives et répulsives.

Nous allons faire voir que *le principe de la conservation de la force vive n'est vrai que pour des forces motrices susceptibles d'être décomposées en forces émanant de points matériels, dirigées suivant les droites qui lient ces points, et dont les intensités ne dépendent que des distances de ces points.*

On donne à ces forces le nom de Forces centrales.

Réciproquement : *Dans toute action mutuelle des corps où le principe de la conservation de la force vive s'applique avec son entière généralité, jusqu'aux moindres particules, les forces élémentaires les plus simples sont des forces centrales.*

Considérons un point matériel de masse m, qui se meut sous l'influence de forces émanant de plusieurs corps formant un système solide A ; et déterminons la position et la vitesse de ce point m à une époque quelconque.

Soit t le temps pris comme variable indépendante.

Soient x, y, z, les coordonnées de m, fonctions de t, dans un système de coordonnées fixé par rapport à A ;

Soit q la vitesse tangentielle de m ;

Soient $u=\frac{dx}{dt}$, $v=\frac{dy}{dt}$, $w=\frac{dz}{dt}$ les composantes de q suivant les axes des coordonnées ;

Soient enfin $X=m\frac{du}{dt}$, $Y=m\frac{dv}{dt}$, $Z=m\frac{dw}{dt}$ les composantes de la force motrice suivant les mêmes axes.

D'après le principe de la conservation de la force vive, la valeur de $\frac{1}{2}mq^2$ ou de q^2 doit être la même chaque fois que le point m revient dans une même position par rapport au système A ; alors q^2 n'est pas seulement fonction de la variable indépendante t, mais on peut définir q^2 comme étant fonction des seules coordonnées x, y, z, et poser l'équation :

$$d(q^2)=\frac{d(q^2)dx}{dx}+\frac{d(q^2)dy}{dy}+\frac{d(q^2)dz}{dz}. \qquad (1)$$

Or,

$$q^2=u^2+v^2+w^2,$$

d'où :

$$d(q^2)=2udu+2vdv+2wdw,$$

Ou bien, d'après les notations indiquées :

$$d(q^2)=\frac{2X}{m}dx+\frac{2Y}{m}dy+\frac{2Z}{m}dz. \qquad (2)$$

Pour que les équations (1) et (2) puissent exister si-

multanément, quels que soient dx, dy, dz, il faut que l'on ait :

$$\frac{d(q^2)}{dx} = \frac{2X}{m}, \quad \frac{d(q^2)}{dy} = \frac{2Y}{m}, \quad \frac{d(q^2)}{dz} = \frac{2Z}{m}.$$

Et q^2 étant fonction de x, y, z seuls, il s'ensuit aussi que les quantités X, Y, Z, c'est-à-dire la *direction* et l'*intensité de la force motrice*, *dépendent seulement de la position du point* m *par rapport au système* A.

Si au lieu du système A on ne considère qu'un seul point particulier a de ce système, *la direction et l'intensité de la force avec laquelle* a *agit sur* m, *ne sont déterminées que par la position de* m *par rapport au point* a.

Or, la position de m n'étant déterminée que par rapport à un seul point a, il n'y a rien de déterminé que la distance ma, parce que la direction du rayon vecteur ne peut être déterminée par un seul point. Alors la loi se modifierait en ce que *la direction et l'intensité de la force seraient dans ce cas des fonctions de cette distance* r.

Prenons le point a pour origine des coordonnées, quel que soit d'ailleurs le système, et nous aurons :

$$m d(q^2) = 2X dx + 2Y dy + 2Z dz = 0, \qquad (3)$$

tant que :

$$d(r^2) = 2x dx + 2y dy + 2z dz = 0,$$

ou que :

$$dz = -\frac{x dx + y dy}{z}.$$

Cette valeur introduite dans (3) donne, quels que soient dx et dy,

$$(X - \frac{x}{z} Z) dx + (Y - \frac{y}{z} Z)\, dy = 0 :$$

d'où :

$$X = \frac{x}{z} Z, \quad \text{et} \quad Y = \frac{y}{z} Z ;$$

c'est-à-dire que la résultante doit être dirigée vers l'origine des coordonnées, vers le point moteur *a*.

Donc *dans tout système soumis d'une manière entièrement générale à la loi de la conservation de la force vive, les forces élémentaires des points matériels sont des forces centrales.*

II

PRINCIPE DE LA CONSERVATION DE LA FORCE

La loi précédente est susceptible d'une expression encore plus générale dans le cas des forces centrales.

Soit φ l'intensité de la force, agissant dans la direction de r, positive quand elle attire, négative quand elle repousse ; ses composantes sont :

$$X = -\frac{x}{r}\varphi, \quad Y = -\frac{y}{r}\varphi, \quad Z = -\frac{z}{r}\varphi. \qquad (1)$$

En ayant égard à l'équation (2) du chapitre I^{er}, nous aurons :

$$md(q^2) = -2\frac{\varphi}{r}(xdx + ydy + zdz).$$

Comme on a :

$$2(xdx + ydy + zdz) = 2rdr,$$

il s'ensuit que :

$$\frac{1}{2}md(q^2) = -\varphi dr.$$

Appelons Q et q les vitesses tangentielles en deux positions quelconques ; R et r les distances correspondantes, et intégrons, il vient :

$$\frac{1}{2}mQ^2 - \frac{1}{2}mq^2 = -\int_r^R \varphi . dr. \qquad (2)$$

Le premier membre de cette équation (2) représente

la différence des forces vives que possède le point matériel m à deux distances différentes.

Quant à la signification de l'intégrale définie $\int_r^R \varphi dr$, on la trouvera facilement, en imaginant que les valeurs de φ, correspondantes aux différents points de la droite ma, soient représentées par des ordonnées perpendiculaires à cette droite. Alors cette intégrale ne sera autre chose que l'aire comprise entre l'axe des abscisses, les ordonnées qui mesurent les valeurs extrêmes de φ, en r et en R, et la courbe qui relie les sommets de toutes les ordonnées mesurant les valeurs consécutives de φ depuis la première limite r, jusqu'à la seconde limite R.

Appelons *tension* la force qui tend à mouvoir le point matériel m, avant que le mouvement soit effectué, par opposition à ce que la mécanique appelle *force vive*.

Nous appellerons alors *Quantité des Tensions* agissant entre les limites r et R, l'intégrale $\int_r^R \varphi dr$, par analogie à ce que la mécanique désigne sous le nom de *Quantité des Forces vives ;* et l'équation (2) s'énoncera ainsi : *L'accroissement de la force vive d'un point matériel dans son mouvement sous l'influence d'une force centrale, est égal à la quantité des tensions qui correspondent à la variation relative de sa distance au centre d'action.*

Imaginons deux points matériels sous l'influence d'une force attractive, et situés à une distance R ; en vertu de cette force ils se rapprochent jusqu'à une distance r : leur vitesse croît, ainsi que la force vive.

Mais si la nouvelle distance r devenait plus grande que R, la force vive de ces deux points diminuerait, et pourrait finir par être annulée.

Donc pour les forces *attractives* la somme des tensions à toutes les distances comprises depuis $r = 0$, jusqu'à $r = \mathrm{R}$ est disponible et égale à $\int_0^{\mathrm{R}} \varphi dr$; au contraire la somme des tensions comprises depuis $r = \mathrm{R}$ jusqu'à $r = \infty$, est détruite et égale à $\int_{\mathrm{R}}^{\infty} \varphi dr$.

Les premières peuvent entrer immédiatement en activité ; les secondes ne le pourraient qu'après une dépense équivalente de force vive.

C'est le contraire pour les forces *répulsives*. Les points étant à la distance R, leur éloignement leur fait gagner de la force vive, et les tensions disponibles seront comprises entre $r = \mathrm{R}$ et $r = \infty$; tandis que les tensions perdues seront comprises entre $r = 0$ et $r = \mathrm{R}$.

Dans la suite de cette étude, nous emploierons les termes proposés par M. Rankine. Nous désignerons sous le nom d'*Energie potentielle* la quantité des tensions disponibles, encore capables de produire un effet ; et sous le nom d'*Energie actuelle*, la quantité des Forces vives.

Alors le résultat exprimé par l'équation (2) pourra s'énoncer ainsi : *Dans le mouvement d'un point sous l'influence d'une force centrale dirigée vers un centre fixe, la somme des Energies actuelles et potentielles reste constante.*

Pour compléter la généralité de cette loi, considérons un nombre quelconque de points matériels m_1, m_2, m_3.... m_n....

soient : x_α, y_α, z_α les coordonnées du point général m_α;

X_α, Y_α, Z_α les composantes des forces appliquées au point m_α ;

u_α, v_α, w_α les composantes des vitesses tangentielles q_α ;

$r_{(\alpha\beta)}$ la distance de deux points matériels quelconques m_α et m_β ;

et soit $\varphi_{(\alpha\beta)}$ la force centrale agissant entre les deux mêmes points m_α et m_β.

Pour un point particulier m_n, on aura d'après les équations (1):

$$X_n = \sum\left[(x_\alpha - x_n)\frac{\varphi_{(\alpha n)}}{r_{(\alpha n)}}\right] = m_n\frac{du_n}{dt} ;$$

$$Y_n = \sum\left[(y_\alpha - y_n)\frac{\varphi_{(\alpha n)}}{r_{(\alpha n)}}\right] = m_n\frac{dv_n}{dt} ;$$

$$Z_n = \sum\left[(z_\alpha - z_n)\frac{\varphi_{(\alpha n)}}{r_{(\alpha n)}}\right] = m_n\frac{dw_n}{dt}.$$

Le signe Σ comprend tous les termes que l'on obtient en donnant à l'indice α toutes les valeurs 1, 2, 3.... excepté n.

Multiplions la première égalité par $dx_n = u_n dt$, la seconde par $dy_n = v_n dt$, la troisième par $dz_n = w_n dt$, et appliquons les trois nouvelles équations à tous les points m_β, comme nous l'avons fait pour m_n. Il vient

$$\sum\left[(x_\alpha - x_\beta)dx_\beta\frac{\varphi_{(\alpha\beta)}}{r_{(\alpha\beta)}}\right] = \sum\left[\frac{1}{2}m_\alpha d(u_\alpha^2)\right],$$

$$\sum\left[(y_\alpha - y_\beta)dy_\beta\frac{\varphi_{(\alpha\beta)}}{r_{(\alpha\beta)}}\right] = \sum\left[\frac{1}{2}m_\alpha d(v_\alpha^2)\right],$$

$$\sum\left[(z_\alpha - z_\beta)dz_\beta\frac{\varphi_{(\alpha\beta)}}{r_{(\alpha\beta)}}\right] = \sum\left[\frac{1}{2}m_\alpha d(w_\alpha^2)\right].$$

Les termes du premier membre s'obtiennent en mettant pour α tous les indices 1, 2, 3,... et pour β tous les indices supérieurs ou inférieurs à celui qui correspond pour α. Les sommes Σ comprennent ainsi deux séries : dans l'une α est toujours plus grand que β, dans l'autre toujours plus petit; et il est clair qu'à chaque terme d'une série, tel que celui-ci :

$$(x_p - x_q)\,dx_q\,\frac{\varphi(pq)}{r(pq)}$$

correspond dans l'autre série un terme :

$$(x_q - x_p)\,dx_p\,\frac{\varphi(pq)}{r(pq)}.$$

La somme de ces deux termes est

$$-(x_p - x_q)\,(dx_p - dx_q)\,\frac{\varphi(pq)}{r(pq)}.$$

Cette simplification étant faite sous les trois signes Σ, en les ajoutant, et posant

$$\frac{1}{2}\,d\left[(x_\alpha - x_\beta)^2 + (y_\alpha - y_\beta)^2 + (z_\alpha - z_\beta)^2\right] = r_{\alpha\beta}\,dr_{\alpha\beta},$$

on aura :

$$-\Sigma\left[\varphi_{\alpha\beta}\,dr_{\alpha\beta}\right] = \Sigma\left[\frac{1}{2}\,m_\alpha\,d(q^2{}_\alpha)\right], \qquad (3)$$

ou bien

$$-\Sigma\left(\int_{r_{\alpha\beta}}^{\mathrm{R}_{\alpha\beta}} \varphi_{\alpha\beta}\,dr_{\alpha\beta}\right) = \Sigma\left[\frac{1}{2}\,m_\alpha\,\mathrm{Q}^2{}_\alpha\right] - \Sigma\left[\frac{1}{2}\,m_\alpha\,q^2{}_\alpha\right], \qquad (4)$$

R et Q étant respectivement la distance et la vitesse tangentielle, à une époque limite, comme r et q.

Nous avons encore dans le premier membre la somme des Energies potentielles détruites; dans le second la somme des forces vives de tout le système ; et enfin dans ce cas plus général, nous obtenons la même loi que précédemment, savoir :

Dans tous les cas du mouvement de points matériels libres sous l'influence de leurs forces attractives et répulsives dont les intensités ne dépendent que des distances, la diminution de l'Energie potentielle est toujours égale à l'accroissement de la force vive ; et l'accroissement de l'Energie potentielle est égal à la diminution de la force vive. En d'autres termes: LA SOMME DES FORCES VIVES ET DES ÉNERGIES POTENTIELLES EST TOUJOURS CONSTANTE.

Sous cette forme la plus générale nous pouvons désigner notre loi sous le nom de *Principe de la conservation de la force.*

Dans la démonstration que nous avons donnée de la loi, rien n'est changé, quand un certain nombre des points, que nous désignerons par l'indice courant ε, deviennent fixes, de sorte que la vitesse $q_\varepsilon = 0$; l'expression de la loi devient :

$$\sum\left[\varphi_{(\alpha\beta}\, dr_{(\alpha\beta)}\right] + \sum\left[\varphi_{(\alpha\delta)} dr_{(\alpha\delta)}\right] = -\sum\left[\frac{1}{2} m_\beta\, d(q^2{}_\beta)\right]. \quad (5)$$

Il reste encore à étudier la relation qui existe entre ce principe de la conservation de la force et le principe des vitesses virtuelles, loi fondamentale de la statique. Cette relation résulte immédiatement de nos équations (3) et (5).

Dans le cas où l'équilibre a lieu pour une certaine position des points m_α, c'est-à-dire dans le cas où ces points sont en repos et où $q_\alpha = 0$, si leur état de repos doit persister, il faut que $dq_\alpha = 0$, et l'équation (3) donne :

$$\sum \left[\varphi_{(\alpha\beta)} dr_{(\alpha\beta)} \right] = 0, \qquad (6)$$

ou bien si des forces émanant de points m_β agissent en dehors du système, l'équation (5) :

$$\sum \left[\varphi_{(\alpha\beta)} dr_{(\alpha\beta)} \right] + \sum \left[\varphi_{\alpha\delta)} dr_{\alpha\delta)} \right] = 0. \qquad (7)$$

Dans ces équations dr désigne des variations de la distance, produites par de petits déplacements quelconques des points m_α, compatibles avec les autres conditions du système.

Dans les démonstrations précédentes, on a vu qu'une augmentation de force vive, ou qu'un passage du repos au mouvement, ne peut avoir lieu que par une dépense d'Énergie potentielle; les dernières équations expriment que dans le cas où aucun mouvement, en aucune des directions possibles, n'effectue une dépense d'Énergie potentielle au premier instant, le système, une fois en repos, y persiste.

On sait que toutes les lois de la statique peuvent se déduire des équations qui viennent d'être posées.

La conséquence la plus importante pour la nature des forces motrices, est celle-ci : Au lieu de petits déplacements quelconques des points m, considérons ceux qui peuvent avoir lieu quand le système est rigide, de sorte

que dans l'équation (7) on a $dr_{\alpha\beta}=0$; alors on a séparément :

$$\sum\left[\varphi_{(\alpha\beta)}dr_{(\alpha\beta)}\right]=0,$$

et

$$\sum\left[\varphi_{(\alpha\beta)}dr_{(\alpha\beta)}\right]=0;$$

c'est-à-dire : *les forces extérieures, aussi bien que les forces intérieures, doivent satisfaire par elles-mêmes aux conditions d'équilibre.*

Si donc un système quelconque de corps est amené dans une position d'équilibre par des forces extérieures, cet équilibre ne cessera pas : 1° lorsque les points particuliers du système seront liés invariablement entre eux, dans leur position actuelle, et 2° lorsque l'on supprimera leurs forces réciproques.

Il s'ensuit encore : que si les forces réciproques de deux points matériels sont en équilibre avec deux forces extérieures appliquées aux mêmes points, celles-ci sont encore en équilibre, quand aux forces réciproques des points on substitue une liaison invariable.

Or des forces appliquées à deux points d'une ligne droite rigide, ne sont en équilibre qu'à la condition d'être dirigées suivant cette ligne, et en sens opposés : donc les forces émanant des points matériels et qui sont égales et opposées aux forces extérieures, sont dirigées suivant la droite de réunion, et sont attractives ou répulsives.

Ces propositions peuvent se résumer ainsi :

1) Chaque fois que des corps agissent entre eux

l'aide de forces attractives ou répulsives indépendantes du temps et de la vitesse, la somme de leurs Énergies actuelles et potentielles est constante. Le maximum de la quantité de travail qu'on peut en obtenir est déterminé et fini.

2) S'il existe au contraire entre les corps des forces qui dépendent du temps et de la vitesse, ou qui agissent suivant d'autres directions que celle de la liaison de deux quelconques des points matériels actifs (par exemple, des forces rotatoires), alors des combinaisons de tels corps pourraient créer ou détruire indéfiniment de la force.

3) Dans l'équilibre d'un système de corps sollicité par des forces centrales, les forces intérieures et extérieures sont en équilibre d'elles-mêmes, si les corps du système sont supposés liés entre eux invariablement, et si tout le système n'est mobile que par rapport à des corps séparés de lui. Un tel système invariable ne pourra donc jamais être mis en mouvement par des forces intérieures, mais seulement par des forces extérieures.

S'il y avait d'autres actions que les forces centrales, il pourrait exister des systèmes invariables de corps qui se mettraient d'eux-mêmes en mouvement sans avoir besoin de relation avec d'autres corps.

III

APPLICATION DU PRINCIPE AUX THÉORÈMES DE LA MÉCANIQUE

Avant de traiter des applications particulières de la loi de l'*Invariabilité de la force*, rappelons les problèmes dans lesquels on a jusqu'à présent reconnu et utilisé le principe de la conservation de la force vive :

1° *Dans tous les mouvements dus à l'influence de la force de gravitation universelle*, tels que ceux des corps célestes, et ceux des graves près de la surface du globe terrestre.

Dans les mouvements des corps célestes, le principe est exprimé par l'accélération de leur vitesse quand ils s'approchent du corps central ; par l'invariabilité des grands axes de leurs orbites ; enfin par la durée de leurs parcours et de leurs rotations.

Dans les mouvements des corps qui tombent à la surface du globe, le principe est exprimé par ce fait que leur vitesse ne dépend que de la hauteur de leur chute, et non pas de la direction ni de la forme de leur trajectoire ; et par cet autre fait que cette vitesse finale est exactement égale à la vitesse initiale qu'il faudrait leur imprimer pour les ramener à leur hauteur primitive. Nous supposons, bien entendu, que dans ce cas les corps, en tombant, ne sont soumis ni à la friction ni à la résistance de l'air.

On a déjà rappelé que la hauteur de la chute d'un poids déterminé sert de mesure au travail des machines.

2° *Dans la transmission des mouvements au moyen de corps incompressibles, solides ou liquides*, dès qu'il n'y a ni frottement ni choc de corps non élastiques.

Alors notre principe général se trouve ordinairement exprimé sous forme d'une règle presque populaire : dans tout mouvement transmis et modifié par des puissances mécaniques, il y a une perte de force proportionnelle à la vitesse gagnée.

Ainsi supposons une machine motrice produisant dans des temps égaux des quantités égales de travail, par un procédé quelconque ; cette machine, étant capable d'élever une masse m avec une vitesse c, élèvera la masse $m \cdot n$ avec une vitesse $\frac{c}{n}$; dans ces deux cas l'Énergie potentielle développée dans l'unité de temps par la machine, est toujours mgc, en appelant g l'intensité de la gravité.

3° *Dans les mouvements des corps solides et liquides parfaitement élastiques.*

La condition de l'élasticité parfaite consiste en ce que le corps déformé reprend complétement la figure et la forme qu'il possédait avant les changements qu'il a subis, pour autant qu'à l'intérieur il n'y ait pas de frottement entre les particules.

C'est alors que notre principe a été reconnu en premier lieu, et le mieux utilisé. Citons comme applications les plus ordinaires aux corps solides : le choc élastique, dont les lois se déduisent facilement de notre principe et de celui de la conservation du centre de gra-

vité ; les vibrations élastiques de tous genres, qui persisteraient sans nouvelle impulsion, si elles n'étaient éteintes par les frottements intérieurs, et par la communication de leur mouvement au milieu extérieur.

Dans les fluides, soit liquides (état dans lequel l'élasticité existe, mais avec un coefficient très-élevé, et dans lequel les molécules ont des positions d'équilibre), soit gazeux (état dans lequel le coefficient d'élasticité est faible, et dans lequel les molécules n'ont pas de position d'équilibre sans pression extérieure), les mouvements se propagent généralement sous forme d'ondes : tels sont les ondes des surfaces liquides, la transmission du son et probablement le rayonnement de la lumière et de la chaleur.

La force vive d'une particule Δm appartenant à un milieu traversé par une ondulation, se détermine par la vitesse qu'elle possède, en repassant par sa position d'équilibre.

L'équation générale des ondes fait connaître la vitesse u, au moyen de l'intensité a^2, de l'amplitude λ, de la vitesse de translation α, à une époque t et à une distance x de l'origine, savoir :

$$u = a \cos \left\{ \frac{2\pi}{\lambda} (x - \alpha t) \right\}.$$

Dans la position d'équilibre on a $u = a$; alors la force vive de la particule Δm, pendant le mouvement ondulatoire, est $\frac{1}{2} \Delta m \, . \, a^2$, c'est-à-dire proportionnelle à l'intensité.

Si les ondes se propagent à partir d'un centre sous forme de sphère, elles communiquent leur mouvement

à des masses toujours plus grandes, leur intensité diminue, tandis que leur force vive reste la même. Mais les masses ébranlées par l'onde augmentent avec le carré de la distance : il en résulte la loi connue du décroissement de l'intensité dans le rapport inverse.

Les lois de la réflexion, de la réfraction et de la polarisation de la lumière, à la surface de séparation de deux milieux doués de différentes vitesses de vibrations, ont été démontrées par Fresnel en se fondant sur la concordance du mouvement des molécules des deux milieux à la surface de leur séparation et sur le principe de la conservation de la force vive.

Dans l'interférence de deux ondes, la force vive n'est pas anéantie, mais autrement distribuée.

Si deux ondes d'intensités a^2 et b^2 n'interfèrent pas, elles communiquent à tous les points rencontrés l'intensité (a^2+b^2).

Si elles interfèrent, les maxima $(a+b)^2$ et les minima $(a-b)^2$ sont supérieurs ou inférieurs à (a^2+b^2) de la quantité $2ab$.

La force vive des ondes élastiques n'est anéantie que dans les cas désignés sous le nom d'*absorption*. L'absorption des ondes sonores a lieu principalement par leur choc contre des corps non élastiques et très-mobiles, tels que des draperies ou des couvertures. On peut considérer le mouvement absorbé comme ayant été transmis aux corps rencontrés et détruits par le frottement. On ne sait pas encore si le mouvement peut être anéanti par le frottement des particules d'air les unes contre les autres.

L'absorption des rayons de chaleur est accompagnée

d'un dégagement proportionnel à l'absorption ; nous verrons plus loin jusqu'à quel point il concorde avec un certain équivalent de force. La conservation de la force aurait lieu, si la quantité de chaleur perdue par le corps rayonnant reparaissait entièrement dans le corps exposé au rayonnement, en tenant compte des pertes occasionnées par la conductibilité ou la diffusion. Ce théorème est encore admis hypothétiquement dans toutes les recherches sur le rayonnement ; mais il n'est fondé sur aucune expérience positive.

Quant à l'absorption des rayons de lumière par les corps imparfaitement transparents ou opaques, il faut distinguer trois genres d'action :

1° Les corps phosphorescents s'emparent de la lumière, et la restituent à l'état de lumière.

2° La plupart, et peut-être tous les rayons lumineux sont capables de produire de la chaleur.

L'hypothèse de l'identité des rayons calorifiques, lumineux et chimiques du spectre, paraît dans ces derniers temps avoir dissipé les objections (1) ; toutefois, l'équivalent calorifique et chimique des rayons lumineux paraît très-faible, comparé à leur action sur l'œil. Si l'identité de ces différentes radiations ne se confirmait pas, on ne pourrait définir le but du mouvement lumineux.

3° Dans beaucoup de circonstances la lumière absorbée produit des actions chimiques.

Quant aux relations qui peuvent exister entre les forces, il faut ici distinguer deux genres d'effets.

(1) Voy. Melloni, *Ann. de Pogg.*, LVII, p. 300. — Brücke, *ibid.*, LXV, p. 593.

D'abord celui où la lumière ne fait que donner à l'affinité chimique une impulsion analogue à celle qui vient de la force de contact : citons par exemple, l'action bien connue des rayons lumineux sur un mélange de chlore et d'hydrogène.

Ensuite celui où la lumière contrarie l'affinité chimique : c'est ce qui a lieu par exemple à l'égard des sels d'argent, décomposés par les rayons lumineux, et à l'égard des parties vertes des végétaux.

Dans le plus grand nombre de ces phénomènes, les effets de la lumière sont encore si peu connus, que l'on ne peut apprécier les intensités des forces qui y prennent part. Leur effet sur les parties vertes des plantes semble être le seul qui ait une importance par la quantité et par l'intensité.

IV

ÉQUIVALENT DE LA FORCE ET DE LA CHALEUR

Les faits mécaniques dans lesquels on admet jusqu'à présent une perte de force sont :

1° *Le choc des corps non élastiques.* Ce choc est lié à une déformation et à une condensation des corps choqués, et par suite à une augmentation de l'Energie potentielle. On observe, de plus, après des chocs fréquemment répétés, un dégagement considérable de chaleur : par exemple, en martelant une pièce de métal ; enfin une partie du mouvement est transmise aux corps choqués, solides et gazeux, et produit le son.

2° *Le frottement*, qui a lieu tant aux surfaces de deux corps qui se meuvent l'un contre l'autre, que dans l'intérieur, lors des déformations par le déplacement relatif des particules.

Dans le frottement, on remarque de légères modifications de la constitution moléculaire des corps, notamment au commencement de l'action ; plus tard, les surfaces s'accommodent entre elles, de sorte que ces modifications deviennent insensibles malgré la continuation du mouvement. Dans bien des cas, ces modifications n'ont pas lieu, par exemple entre les fluides et les solides, ou les fluides entre eux. En outre, on remarque quelquefois des modifications thermiques ou électriques.

En mécanique, le frottement est considéré comme une force opposée au mouvement effectif, et dont l'in-

tensité est fonction de la vitesse. Il est évident que cette manière d'envisager le frottement n'a d'autre intérêt que la facilité du calcul, mais n'exprime que très-imparfaitement le phénomène compliqué dans lequel agissent et se transforment les forces moléculaires.

Il résulte cependant de cette manière de considérer le frottement, une perte de force vive; on l'admet également dans le choc des corps élastiques.

Mais on n'a pas remarqué que, abstraction faite de l'accroissement d'Énergie potentielle, dû à la compression des corps frottants ou choquants, la chaleur gagnée représente une force capable de fournir des effets mécaniques ; il en est de même de l'électricité qui se développe presque toujours, et qui engendre directement des forces attractives ou répulsives, ou indirectement de la chaleur.

Il y aurait donc lieu de vérifier si la somme de ces forces correspond toujours à la perte de force mécanique? Dans le cas où les modifications moléculaires et le dégagement de l'électricité pourraient être évités, cette question reviendrait à celles-ci : *Une certaine perte de force mécanique entraîne-t-elle toujours le dégagement d'une quantité de chaleur déterminée?*

Et jusqu'à quel point une quantité de chaleur peut-elle correspondre à un équivalent de force mécanique ?

Pour répondre à la première question, nous possédons peu de données. Joule (1) a cherché les quantités

(1) *J. T. Joule*, On the existence of an equivalent relation between heat and the ordinary forms of mechanical power. *Phil. Mag.*, XXVIII, 205. [Sur l'existence d'un rapport d'équivalence entre la chaleur et les forces ordinaires de la mécanique.]

de chaleur dégagées par frottement, soit dans des tubes étroits, soit dans un réservoir : le liquide était mis en mouvement par une roue construite dans le genre d'une turbine. Dans le premier cas, la quantité de chaleur capable d'élever d'un degré centigrade la température d'un kilogramme d'eau, correspond à l'élévation d'un poids de 452 kilogrammes à un mètre de hauteur ; dans le second cas, cette même quantité de chaleur correspond à l'élévation de 521 kilogrammes à la même hauteur.

Mais les procédés de ce physicien n'ont pas la précision que comporte la difficulté de la question. Les résultats ne peuvent prétendre à l'exactitude ; ils sont probablement trop forts, car dans les expériences citées, il pouvait y avoir des pertes de chaleur inaperçues, tandis que l'absorption inévitable de force mécanique dans les autres parties de l'appareil n'a pas été comptée (1).

Examinons la seconde question : Jusqu'à quel point la chaleur correspond-elle à un équivalent de force ?

La théorie matérielle de la chaleur considère nécessairement comme constante la quantité de substance calorifique ; et d'après elle, cette substance ne manifeste une force mécanique que par sa tendance à la dilatation, et l'équivalent mécanique de la chaleur ne peut être autre chose que le travail qu'elle effectue pour passer d'une température élevée à une température moindre.

(1) Les travaux ultérieurs de Joule, inconnus de l'auteur lors de la première publication de cet écrit, ont donné de cette loi une démonstration complète et rigoureuse. Ces travaux ont établi qu'*une calorie équivaut à* 423,5 *kilogrammètres*.

C'est dans ce sens que Carnot et Clapeyron traitèrent la question, et déduisirent toutes les conséquences d'un tel équivalent, au moins pour les gaz et les vapeurs.

Pour expliquer la chaleur due au frottement, la théorie matérielle admet avec W. Henry (1) que cette chaleur est amenée du dehors ; ou bien avec Berthollet (2) qu'elle naît de la compression des surfaces et des parties frottées.

Pour que la première idée fût admissible, il faudrait que le refroidissement des corps voisins correspondît au dégagement de chaleur, quelquefois très-considérable, qui résulte du frottement.

Pour justifier la seconde, il faudrait attribuer à une condensation insensible à l'épreuve de la balance hydrostatique, un effet d'une énergie invraisemblable ; mais, d'ailleurs, elle échoue dans diverses expériences, telles que le frottement des liquides ; le martelage du fer qui se ramollit en devenant rouge ; la fusion de la glace par le frottement (3) ; dans ces dernières le fer ramolli et l'eau de fusion ne sont point restés soumis à la compression.

Le dégagement de chaleur par les mouvements électriques, démontre d'ailleurs que la quantité de chaleur peut être augmentée d'une manière absolue.

Supposons même qu'on néglige l'électricité de frottement et l'électricité voltaïque, parce que la théorie

(1) *Mémoires de la Société de Manchester*, t. V, p. 2, Londres, 1802.

(2) *Statique chimique*, t. I, p. 247.

(3) Humphry Davy, *Essai sur la chaleur, la lumière et les combinaisons de la lumière.*

matérielle serait en droit d'admettre entre l'électricité et la substance calorifique une liaison et un rapport tels que cette substance soit expulsée de son siége primitif et transférée dans le conducteur échauffé : il y a encore deux moyens de rapporter à des causes mécaniques les tensions électriques, sans qu'il existe de la chaleur susceptible d'être déplacée : ces deux moyens sont la distribution et le mouvement magnétiques.

Si l'on approche un conducteur d'un corps électrisé positivement et parfaitement isolé, de manière à ne rien perdre, ce conducteur se charge d'une électricité libre + E; celle-ci pourra se décharger à l'intérieur d'une batterie. En éloignant le conducteur, il reste chargé d'électricité libre — E, laquelle à son tour pourra se décharger à l'extérieur de la même batterie, ou sur une seconde.

En répétant ces opérations, on pourra charger aussi souvent qu'on voudra une batterie quelconque; et la décharge de cette batterie produira de la chaleur sans qu'il y ait refroidissement des corps ambiants.

Par contre, on aura dépensé une certaine quantité de force mécanique ; car chaque fois qu'on a éloigné de la source positive le conducteur chargé négativement, on a dû vaincre l'attraction entre les deux.

C'est évidemment ce qui arrive quand on emploie l'électrophore pour charger une bouteille de Leyde. Il en est de même dans les machines magnéto-électriques : tant que l'aimant et l'armature sont en mouvement l'un vers l'autre, il y a des courants qui produisent de la chaleur dans le fil de réunion. Or, le mouvement de l'armature vers l'aimant est à chaque instant contrarié par

des courants; il y a donc destruction d'une partie de la force mécanique.

On peut ainsi recueillir à l'infini de la chaleur qui n'est pas enlevée aux parties qui constituent la machine.

Joule a cherché à démontrer par expérience (1) que le courant magnéto-électrique dégage aussi de la chaleur et non du froid dans les parties de la spirale qui sont directement sous l'influence de l'aimant.

Il résulte de ces faits que la quantité de chaleur peut être augmentée d'une manière absolue par des forces mécaniques, et que l'apparition de la chaleur ne peut être due à une substance existant préalablement ; mais qu'elle est engendrée par des modifications, par des mouvements, soit d'une substance particulière, soit des corps pondérables ou impondérables déjà connus, par exemple l'électricité ou la lumière (l'éther lumineux).

Ce que l'on a appelé jusqu'ici *quantité de chaleur*, n'est qu'une façon d'exprimer : d'une part, la *quantite de force vive du mouvement calorifique ;* d'autre part, l'*Énergiepotentielle des atomes*, qui, par une modification de leur arrangement, peuvent être causes d'un pareil mouvement ; la première correspond à ce qu'on a nommé jusqu'ici *chaleur libre ou sensible ;* la seconde, à la *chaleur latente*.

S'il est permis d'essayer de faire comprendre encore plus explicitement ce mouvement, il semble qu'une hypothèse analogue aux vues d'Ampère peut résumer l'état de la science à ce sujet.

Imaginons les corps comme formés de molécules et

(1) *Phil. Mag.*, 1844.

chacune de ces molécules comme composée de parties différentes (atomes chimiques, éléments d'électricités, etc.). Chaque molécule a trois sortes de mouvements possibles, savoir :

1° Déplacement du centre de gravité ;

2° Rotation autour du centre de gravité ;

3° Déplacement relatif de ses différents éléments.

Les deux premiers mouvements seraient équilibrés par les forces des atomes voisins, et se propageraient dans ceux-ci sous forme d'ondes : ce mode de transmission correspond au rayonnement, et non à la conductibilité de la chaleur.

Les mouvements relatifs des différents éléments de l'atome sont équilibrés par les forces intérieures de l'atome lui-même ; ces mouvements ne peuvent exercer que lentement leur influence sur les atomes voisins (comme les cordes vibrant par l'influence de cordes voisines), et diminuent d'ailleurs d'une quantité égale au mouvement communiqué. Ce mode de propagation paraît analogue à la conductibilité.

En général il est clair que de tels mouvements atomiques peuvent causer des modifications dans les forces moléculaires, des dilatations et des changements de l'état d'agrégation ; nous ne pouvons savoir de quelle espèce sont ces mouvements, mais leur possibilité suffit à notre but, qui est de considérer les phénomènes de la chaleur comme des mouvements.

La conservation de la force aurait lieu dans ce mouvement dans tous les cas où l'on a reconnu la conservation du *calorique*, notamment dans tous les phénomènes de la conductibilité, du rayonnement d'un corps à

un autre, dans ceux de l'absorption et du dégagement de chaleur lors des changements d'état.

Nous avons déjà parlé de la production de chaleur par rayonnement ou destruction de travail; nous parlerons plus loin de la production due à l'électricité. Il nous reste à traiter ici de celle qui a lieu dans l'action chimique. On l'a considérée comme la mise en liberté de la substance *calorique* existant à l'état latent dans les corps qui entrent en combinaison.

Chaque corps simple et chaque composé susceptible d'entrer dans de nouvelles combinaisons d'un ordre supérieur, doivent contenir une certaine quantité de *substance calorique latente*, essentielle à sa constitution chimique ; on en a conclu cette loi, que l'expérience confirme en partie : *Dans la combinaison chimique de plusieurs substances, donnant un même résultat, la même quantité de chaleur est dégagée, quels que soient l'ordre, la durée et les produits intermédiaires pendant cette combinaison* (1).

D'après nous, la quantité de chaleur développée dans l'action chimique n'est autre chose que la quantité de force vive engendrée par une quantité déterminée d'attractions chimiques ; et la loi qui vient d'être énoncée exprime, dans le cas présent, le principe de la conservation de la force.

Quoique la production de chaleur soit hors de doute, on en a aussi peu cherché les lois et les conditions que les lois et les conditions de sa disparition. Jusqu'aujourd'hui, on ne connaît que des décompositions ou

(1) Hess, *Ann. de Pogg.*, liv. 392, LVI, 598.

des changements d'état qui dissimulent de la chaleur.

On ne s'est pas encore demandé si la production du travail mécanique détruit de la chaleur, ce qui est un corollaire de la conservation de la force. On ne peut à cet égard mentionner qu'un travail de Joule (1), qui paraît assez certain. Il a reconnu que l'air qui s'échappe d'un vase de 136,5 p^ces^ cubes, où il était comprimé à 22 atmosphères, refroidit l'eau à 4°,083 F., en se déversant dans l'atmosphère dont il a à vaincre la résistance.

Mais il n'a pas trouvé de changement de température quand cet air comprimé se transvase dans un autre récipient de même capacité et vide, plongé dans le même calorimètre; il n'y a pas alors de résistance à vaincre, et par suite d'action mécanique.

Quel rapport les recherches de Clapeyron et de Holtzmann pour trouver l'équivalent mécanique de la chaleur ont-elles avec les nôtres ?

Clapeyron (2) part de cette considération que *la chaleur ne peut être utilisée comme générateur de la force mécanique que lors de sa communication d'un corps chaud à un corps plus froid ; que le maximum de force s'obtient quand la chaleur est conduite entre des corps d'égale température, mais que les changements de température sont causés par la compression et la dilatation des corps chauffés.* Le maximum devrait être le même pour tous les corps qui peuvent produire un effet mécanique par échauffement et refroidissement ; car s'il variait, on pourrait utiliser le corps dans lequel un cer-

(1) *Philos. Mag.*, XXVI, p. 369.

(2) *Pogg. Ann.*, t. LIX, 446, 566, et *Journal de l'École polytechnique*, t. XIV, 1834.

tain *quantum* de chaleur donne un plus grand effet, à accumuler du travail mécanique ; une partie de ce travail serait ensuite dépensée pour ramener par l'autre corps la chaleur de la source la plus froide vers la plus chaude. On gagnerait donc de la force mécanique à l'infini, en supposant, bien entendu, que la quantité de chaleur n'est pas altérée.

Analytiquement, Clapeyron représente cette loi par la formule

$$\frac{dq}{dv}\cdot\frac{dt}{dp}-\frac{dq}{dp}\cdot\frac{dt}{dv}=\mathrm{C},$$

dans laquelle on désigne par

q la quantité de chaleur contenue dans un corps ; et par t sa température : ces deux quantités sont fonctions du volume v et de la pression p.

$\frac{1}{c}$ est le travail mécanique que l'unité de chaleur peut fournir ; il est le même quel que soit le corps, mais varie avec la température.

Pour les gaz cette formule devient

$$\mathrm{C}=v\frac{dq}{dv}-p\frac{dq}{dp}.$$

Clapeyron a tiré de la généralité de cette formule des conséquences qui, du moins pour les gaz, ont une grande analogie avec les résultats de l'expérience.

La démonstration qu'il donne de la loi générale n'est légitime que lorsque la quantité de chaleur ne varie pas. La formule particulière aux gaz supporte seule le contrôle des faits ; on peut la déduire aussi de la formule de Holtzmann.

Clapeyron s'est borné à faire voir que la loi déduite de sa formule générale n'est pas contraire à la réalité, savoir : Que *si la pression exercée sur divers corps pris à la même température, est augmentée d'une petite quantité, il se développe des quantités de chaleur proportionnelles à leur dilatabilité.*

Ce principe a cependant une conséquence dont l'invraisemblance doit être remarquée : c'est que la compression de l'eau au point de rebroussement de sa densité ne produirait pas de la chaleur, mais du froid entre ce point et celui de la congélation.

Holtzmann (1) part de cette considération qu'*une quantité de chaleur, absorbée par un gaz, peut causer une élévation de température, ou une dilatation sans élévation de température.* Il prend pour équivalent mécanique de la chaleur le travail produit par cette dilatation ; et, d'après les expériences que Dulong a laissées pour déterminer au moyen du son le rapport des deux capacités calorifiques des gaz, il calcula cet équivalent égal à 374 kilogrammètres.

Ce mode de calcul n'est juste, d'après nos vues, que si toute la force vive de la chaleur absorbée est restituée sous forme de travail ; de sorte que la somme des forces vives et des énergies potentielles, c'est-à-dire la quantité de chaleur libre et latente, est la même dans le gaz plus dilaté que dans le gaz plus condensé à la même température. Un gaz qui se dilate sans travail ne changerait pas de température, comme cela semble résulter de

(1) Holtzmann, *Sur la chaleur et l'élasticité des gaz et des vapeurs.* Mannheim, 1845. Voir un extrait de ce travail dans *Poggendorf.*

l'expérience de Joule ; et l'élévation et l'abaissement de température par la compression et la dilatation dans les circonstances ordinaires proviendraient d'une production de chaleur par le travail mécanique, et *vice versa*.

De nombreuses conséquences tirées de la loi de Holtzmann s'accordent avec l'expérience, notamment la formule qui relie les forces élastiques de la vapeur d'eau avec les différentes températures.

Joule estime l'équivalent d'après ses propres expériences à 481, à 464, à 479 ; tandis que par le frottement il l'évalue à 452 et à 521 ; Holtzmann en le calculant d'après les expériences étrangères trouve 374.

La formule de Holtzmann s'accorde avec celle de Clapeyron, pour les gaz ; si seulement la fonction indéterminée de la température C était trouvée, la détermination complète de l'intégrale serait facile.

D'après Holtzmann :

$$\frac{pv}{a} = v\frac{dq}{dv} - p\frac{dq}{dp},$$

a étant l'équivalent mécanique de l'unité de chaleur.

D'après Clapeyron :

$$C = v\frac{dq}{dv} - p\frac{dq}{dp}.$$

Ces deux formules s'accordent donc pour $C = \frac{pv}{a}$; ou bien, comme on a $p = \frac{k}{v}(1+\alpha t)$, α étant le coefficient de dilatation et k une constante, elles s'accordent pour $\frac{1}{C} = \frac{a}{k(1+\alpha t)}$.

Les valeurs calculées par Clapeyron pour $\frac{1}{C}$ s'accor-

dent assez bien avec cette formule, comme on le verra dans ce tableau :

TEMPÉRATURE.	CALCULS DE CLAPEYRON.			D'APRÈS LA FORMULE.
	a	*b*	*c*	
0°	1,410	.....	1,586	1,544
35°,5	.....	1,365	1,292	1,366
78°,8	.....	1,208	1,142	1,198
100°	.....	1,115	1,102	1,129
156°,8	.....	1,076	1,072	0,904

Le nombre de la colonne *a* est calculé d'après la vitesse du son dans l'air ; les nombres de la colonne *b*, d'après les chaleurs latentes des vapeurs d'éther, d'alcool, d'eau, d'huile de térébenthine ; ceux de la colonne *c*, par la force expansive des vapeurs d'eau à différentes températures.

La formule de Clapeyron est donc identique à celle de Holtzmann pour les gaz; mais leur exactitude pour les corps solides et liquides reste douteuse (1).

(1) Depuis que l'auteur a publié cet écrit, cette partie de la théorie a été l'objet d'une étude importante, et d'une grande extension de la part de MM. Clausius et W. Thomson. La loi de Carnot est complétement confirmée ; mais il ne faut pas oublier dans les applications, que tout travail engendré au moyen de la chaleur, détruit une quantité de celle-ci, équivalente à la quantité de travail fournie ; c'est ce que Carnot et Clapeyron n'avaient point remarqué.

L'hypothèse de Holtzmann avait déjà servi à R. Mayer (*Annales de Liebig*, XLII, 1842), pour calculer l'équivalent mécanique de la chaleur ; elle est justifiée pour les gaz parfaits par Joule, W. Thomson et Regnault.

V

ÉQUIVALENT MÉCANIQUE DES PHÉNOMÈNES ÉLECTRIQUES

Électricité statique. — L'électricité des machines peut être, de deux manières, la cause d'un développement de force, savoir : par sa force attractive et répulsive quand elle se meut *avec ses supports*, ou bien par production de chaleur, quand elle se meut *dans les supports*.

Les premiers faits mécaniques sont attribués aux forces attractives et répulsives de deux fluides, agissant en raison inverse du carré de leur distance ; les expériences confirment les calculs fondés sur cette théorie. Le principe de la Conservation de la force doit s'appliquer à ces actions.

Nous observerons les lois spéciales des effets mécaniques de l'Électricité autant qu'il est nécessaire pour démontrer la loi du développement électrique de la Chaleur.

Soient e' et e'' deux masses élémentaires électriques, dont l'unité est celle qui repousse une force égale à la leur, avec une intensité $= 1$, à la distance $= 1$; représentons les électricités contraires par des signes contraires placés devant les masses, par r la distance entre e' et entre e''. L'intensité de leur attraction est

$$\varphi = - \frac{e'e''}{r^2}.$$

L'augmentation de force vive lors du passage de la distance R à la distance r, est

$$-\int_{R}^{r} \varphi dr = \frac{e'e''}{R} - \frac{e'e''}{r}.$$

Si $R = \infty$, on a

$$-\int_{\infty}^{r} \varphi dr = -\frac{e'e''}{r},$$

c'est-à-dire, que l'accroissement de force vive est égal à $-\frac{e'e''}{r}$, lorsque la distance décroît depuis ∞ jusqu'à r.

Si, au contraire, les masses électriques e' et e'' passent de la distance r à la distance ∞, l'accroissement de force vive est égal à la quantité $\frac{e'e''}{r}$, c'est-à-dire à la quantité d'Energie potentielle que peuvent fournir les deux masses e', e'', pendant leur mouvement depuis la distance r jusqu'à la distance ∞. Désignons cette expression $\frac{e'e''}{r}$, d'après la notation de Gauss pour le magnétisme, sous le nom de *Potentiel* des deux éléments électriques pour la distance r : la diminution de force vive pour un mouvement quelconque sera égale à l'excès du Potentiel à la fin du chemin, sur le Potentiel au commencement.

Cela posé, considérons deux corps idio-électriques, dans lesquels la distribution des électricités ne change pas ; désignons la somme des Potentiels d'un Élément électrisé à l'égard de tous les éléments d'un corps électrisé, sous le nom de *Potentiel de l'Elément par rapport au corps ;* et la somme des Potentiels de tous les éléments

d'un corps électrisé à l'égard de tous les éléments d'un autre, sous le nom de *Potentiel des deux corps :* l'augmentation de force vive sera encore donnée par la différence des Potentiels.

Si la distribution varie, la valeur de l'énergie potentielle de l'électricité variera aussi dans les corps eux-mêmes ; il devra en être de même de l'accroissement de force vive.

On trouve l'énergie potentielle de l'électricité d'un corps, en formant et en additionnant tous les produits $+\frac{e'e''}{r}$ appartenant à chaque couple de masses électriques infiniment petites contenues dans ce corps ; de sorte que chaque masse élémentaire en particulier est combinée avec chacune des autres, mais chaque couple n'est compté qu'une fois. C'est la somme W_a ainsi obtenue que nous nommons le Potentiel du corps A par rapport à lui-même.

L'équation (4) (*) fait voir qu'en réalité cette quantité W_a représente l'énergie potentielle d'un corps électrisé unique. S'il existe deux corps A et B tels que W_a soit le potentiel de A par rapport à lui-même, W_b le potentiel de B par rapport à lui-même ; V le potentiel de B par rapport à A, l'énergie potentielle des deux ensemble sera

$$V + W_a + W_b .$$

Ce total n'est autre chose que le Maximum de la force vive disponible, et de l'Energie potentielle accumulée par l'électrisation.

(*) Voyez § II.

Au lieu de ces Potentiels, les considérations suivantes introduiront dans le calcul des données plus courantes. Supposons des surfaces construites de telle façon que le Potentiel d'un de leurs Eléments électriques, par rapport à un ou plusieurs autres corps électrisés, a les mêmes valeurs, et nommons-les *Surfaces d'Equilibre*. Le mouvement d'une particule électrique depuis un point quelconque de l'une jusqu'à un point quelconque d'une certaine autre, augmentera ou diminuera toujours sa force vive d'une même quantité ; tandis que le mouvement de cette particule sur la surface même ne changera pas sa vitesse.

La résultante de toutes les forces attractives électriques pour chaque point particulier de l'Espace doit être perpendiculaire à la surface d'équilibre qui passe par ce point, et chaque surface à laquelle cette résultante est perpendiculaire, doit être une surface d'équilibre.

L'équilibre d'un conducteur n'est possible qu'autant que la Résultante de toutes les forces attractives de sa propre électricité, et d'autres corps électrisés existants, soit perpendiculaire à sa surface, autrement les particules électriques seraient déplacées le long des surfaces.

Par suite, la surface d'un conducteur électrique même sera une surface d'équilibre, et la force vive que gagne un élément électrique, passant de la surface d'un conducteur à la surface d'un autre, est constante.

Soit C_a la force vive que l'unité de l'électricité positive gagne en passant de la surface du conducteur A à une distance infinie, de sorte que C_a est positive pour des charges positives ;

A_a le Potentiel de la même quantité électrique par

rapport à A, quand elle se trouve en un point quelconque de la surface de ce conducteur A ;

A_b son Potentiel par rapport à B ;

W_a le Potentiel de A par rapport à lui-même ;

W_b son potentiel par rapport à B,

V le potentiel de A et B ;

Q_a la quantité électrique de A, et Q_b la quantité électrique de B :

La force vive que l'élément électrique e gagne dans son passage de la surface de A à une distance infinie sera :

$$eC_a = e(A_a + A_b).$$

A la place de e, mettons successivement tous les éléments électriques de la surface de A, et à la place de A_a et A_b les Potentiels correspondants ; et ajoutons :

$$Q_a C_a = V + W_a,$$

et pour le conducteur B :

$$Q_b C_b = V + W_b.$$

La constante C doit être la même non-seulement pour toute la surface d'un même conducteur, mais aussi pour plusieurs conducteurs séparés, quand ceux-ci, au moyen d'une liaison qui empêche leur distribution électrique d'être sensiblement modifiée, ne font pas d'échange entre eux, c'est-à-dire que cette constante est la même pour tous les conducteurs d'une tension électrique égale.

On peut prendre pour mesure de la tension d'un corps électrisé, la quantité d'Electricité, qui, hors de la

distance d'action, serait accumulée dans une sphère de rayon = 1, pour mettre cette sphère en équilibre électrique avec ce corps. Si l'Electricité est répartie uniformément sur la sphère, elle agit au dehors, comme si elle était concentrée au centre.

Appelant E la masse électrique, R = 1 le rayon de la sphère, on aura :

$$C = \frac{E}{R} = E:$$

c'est-à-dire que la constante est exactement égale à la Tension. La somme des énergies potentielles de deux conducteurs qui contiennent des quantités égales Q d'Electricité positive et négative, sera

$$(V + W_a + W_b) = Q\,\frac{C_a - C_b}{2}.$$

Comme C_b est négative, la différence algébrique $C_a - C_b$ est égale à leur somme absolue.

Si la capacité du conducteur B est très-grande, c'est-à-dire $C_b = 0$; si la distance des conducteurs est aussi très-grande, on aura :

$$V = 0, \text{ et } V + 2W_b = 0.$$

Alors l'énergie potentielle du conducteur A sera :

$$\frac{QC_a}{2} = W_a.$$

La force vive, qui naît du mouvement de deux masses électriques, est égale à la diminution de la somme

$$\frac{Q_a C_a + Q_b C_b}{2}.$$

Cette force vive est gagnée mécaniquement, quand la vitesse avec laquelle l'Electricité se meut dans les corps, est infiniment petite par rapport à la vitesse de propagation du mouvement électrique ; elle sera recueillie comme chaleur dans le cas où cela n'est pas. La chaleur Θ engendrée par la décharge de quantités égales Q d'Electricités opposées sera :

$$\Theta = \frac{1}{2a} Q(C_a - C_b) :$$

a étant l'équivalent mécanique de la chaleur ; ou bien, si $C_b = 0$, comme dans les batteries dont les armatures extérieures ne sont pas isolées, et dont la capacité est S, de manière que $CS = Q$,

$$\Theta = \frac{1}{2a} QC = \frac{1}{2a} \frac{Q^2}{S}.$$

Riess (1) a démontré expérimentalement, que pour des charges différentes et un nombre différent de bouteilles égales, la chaleur dégagée dans chaque portion du fil de réunion, est proportionnelle à $\frac{Q^2}{S}$. Seulement il désigne par S la surface de l'armature des bouteilles ; mais si les bouteilles sont d'égale épaisseur, la surface est proportionnelle à la capacité.

Vorsselmann de Heer (2), et Knochenhauer (3) ont aussi démontré que le dégagement de chaleur correspondant à la même charge d'une même batterie est le

(1) *Ann. de Poggend.*, t. XLIII, p. 47.
(2) *Id.*, t. XLVIII, p. 292. Remarque de Riess, p. 320.
(3) *Ibid.*, t. XLII, p. 364 ; t. XLIV, p. 64.

même, quelles que soient les variations du fil de réunion. Knochenhauer a confirmé cette loi dans des fils bifurqués et dans les courants induits dans un fil parallèle au fil conducteur de la décharge. Il n'existe aucune observation connue sur la valeur de $\frac{1}{2a}$.

Cette loi se comprend facilement pourvu que *la Décharge d'une Batterie ne soit pas représentée comme un simple mouvement de l'Electricité dans une direction*, mais comme une série d'oscillations entre les deux armatures; oscillations qui deviennent toujours plus plus petites, jusqu'à ce que la force vive soit éteinte par l'ensemble des résistances.

Quelques phénomènes semblent prouver que le courant de la décharge consiste en deux courants alternatifs opposés : d'abord l'effet magnétique alternatif opposé ; ensuite le dégagement simultané des deux gaz Hydrogène et Oxygène aux deux extrémités des Electrodes, phénomène signalé par Wollaston dans la décomposition de l'eau par les décharges de Batteries. Cette idée explique en même temps l'utilité de réduire, pour cette expérience, les surfaces des Electrodes (1).

Galvanisme. — Il faut ici distinguer deux catégories de conducteurs :

1° Ceux qui conduisent comme les métaux, et suivent la loi de la série de tension galvanique ;

2° Ceux qui ne suivent pas cette loi. Tous ces derniers sont des liquides composés, et subissent à chaque

(1) Les courants de décharge opposés ont été constatés depuis par MM. Feddersen, Oettingen, Paatzon (*Ann. de Poggendorf*, t. CXII, CXIII, CXV).

passage une décomposition proportionnelle à la quantité de l'Électricité conduite.

Les données expérimentales peuvent se classer comme suit :

1° Celles que fournissent les conducteurs de la première catégorie : les charges inégales de métaux différents en contact,

Et 2° celles que fournissent les conducteurs de la seconde catégorie : la différence de tension électrique des piles galvaniques, et les courants électriques des circuits fermés.

Par une combinaison quelconque de conducteurs de la première classe, on n'obtient jamais de courants, mais seulement des tensions électriques.

Ces tensions ne sont pas équivalentes à une certaine quantité de force, comme celles qui ont été envisagées jusqu'ici, et qui désignaient un dérangement de l'équilibre électrique ; *les tensions galvaniques caractérisent plutôt le rétablissement de l'équilibre électrique ;* elles ne peuvent occasionner aucun mouvement de l'Électricité, si ce n'est lorsque les conducteurs eux-mêmes changent de position, par suite d'une autre distribution des Electricités dissimulées.

Si tous les métaux du globe étaient en contact, et avaient une certaine distribution électrique, aucune autre combinaison ne pourrait modifier la tension électrique de l'un quelconque d'entre eux sans l'intervention d'un contact avec un conducteur de la seconde classe.

Jusqu'à présent on n'a pas précisé la conception de la force de contact, de cette force qui s'exerce au contact de deux métaux différents, qui produit leurs tensions

électriques différentes et les entretient ; on a cherché à embrasser dans la même conception les phénomènes du contact des conducteurs de la première et de la seconde classe, à l'époque où l'on n'avait pas encore reconnu que la différence constante et essentielle des deux phénomènes consiste précisément dans l'acte chimique.

Par suite de cette indétermination inévitable de la notion, la force de contact apparaît alors comme pouvant développer à l'infini des quantités d'Electricité libre, ainsi que de la force mécanique, de la chaleur et de la lumière, quand il existe un seul conducteur de la seconde catégorie, qui n'est pas électrolysé par la transmission.

C'est justement cette circonstance qui a opposé un obstacle si décisif à la théorie du contact en dépit de sa précision et de sa simplicité dans l'explication des phénomènes (1).

Le principe que nous avons établi est en opposition directe avec la notion admise jusqu'ici de cette force, si la nécessité de l'action chimique n'est pas admise en même temps. Mais si l'on admet que l'électrolyse est la cause par laquelle les conducteurs de la seconde classe ne suivent pas la série des tensions galvaniques, alors la théorie de la force de contact peut être simplifiée et ramenée à celle des forces attractives et répulsives.

Tous les phénomènes des conducteurs de la première catégorie se déduisent de la supposition que les

(1) Faraday, *Recherches expérimentales sur l'Électricité*, 17e série, *Phil. Trans.*, 1840, p. 1, n° 271, et *Ann. de Poggendorf*, t. LIII, p. 568.

diverses substances chimiques exercent des attractions d'intensités différentes à l'égard des deux Electricités ; que ces attractions ne se manifestent qu'à des distances insensibles, tandis que les Electricités agissent les unes sur les autres à de grandes distances.

La force de contact consisterait donc alors dans la différence des forces attractives exercées sur les Electricités par les particules métalliques, à l'endroit même du contact. L'équilibre électrique aurait lieu, quand un élément électrique passant d'un mètal à l'autre, ne gagne ni ne perd de la force vive.

Soient c' et c'' les tensions électriques des deux métaux ;

$a'e$ et $a''e$ les forces vives, gagnées par l'élément électrique e, dans son passage sur l'un ou sur l'autre métal non chargé ;

La force vive gagnée dans son passage d'un métal chargé à l'autre sera :

$$e(a' - a'') - e(c' - c'').$$

Lors de l'équilibre, cette force $= 0$, et

$$a' - a'' = c' - c''.$$

C'est-à-dire, que la différence de tension est constante entre les diverses parties de chaque métal, et suit la loi de la série des tensions galvaniques, dans les différents métaux.

Relativement à la conservation de la force, nous avons à considérer dans les courants galvaniques, les principaux effets suivants : *Développement de chaleur*, *Action chimique* et *Polarisation*.

Les effets *électrodynamiques* seront étudiés avec le Magnétisme.

Le développement de chaleur est commun à tous les courants. Quant aux deux autres effets, il y a lieu de distinguer les courants qui produisent seulement des décompositions chimiques, ceux qui ne produisent que la Polarisation, et ceux qui produisent simultanément ces deux effets.

Cherchons d'abord les conditions de la Conservation de la force dans les piles où la Polarisation est évitée ; elles sont les seules pour lesquelles nous ayons des lois vérifiées par des mesures certaines.

L'intensité du courant J d'une pile de n éléments est exprimée suivant Ohm par la formule :

$$J = \frac{nA}{W},$$

dans laquelle A est une constante représentant la force électro-motrice de chaque élément ; W la résistance de la pile.

Dans les piles où la polarisation n'existe pas, les quantités A et W sont indépendantes de l'Intensité.

Dans ces piles, rien ne varie pendant un certain temps, excepté les rapports chimiques et la quantité de chaleur. La loi de la Conservation de la force exigerait que la chaleur qui doit naître de l'action chimique actuelle, fût égale à celle qui est réellement gagnée.

Dans un simple morceau d'un conducteur métallique

dont la résistance est w, la chaleur dégagée dans l'unité de temps est, d'après Lenz (1) :

$$\theta = J^2 w t,$$

en prenant pour unité de la résistance w, la longueur de fil dans laquelle l'unité du courant développe l'unité de chaleur dans l'unité de temps.

Pour les conducteurs bifurqués ou juxtaposés, dont les résistances particulières sont désignées par w_a, la résistance totale w sera donnée par la formule

$$\frac{1}{w} = \sum \left[\frac{1}{w_a} \right];$$

l'intensité J_n dans une branche w_n sera

$$J_n = \frac{J_w}{w_n};$$

la chaleur θ_n dans la même branche

$$\theta_n = J^2 w^2 \frac{1}{w_n} t;$$

et la chaleur développée dans tout le conducteur divisé en plusieurs branches

$$\theta = \sum \left[\theta_a \right] = J^2 w^2 \sum \left[\frac{1}{w_a} \right] t = J^2 w t.$$

Si la loi de Lenz s'applique aux liquides, la chaleur totale développée dans une pile munie d'un conducteur divisé en un nombre quelconque de branches sera, comme Joule l'a trouvé :

$$\Theta = J^2 W t = nAJt.$$

(1) *Ann. de Pogg.*, LIX, p. 203 et 407. Extrait des *Bulletins de l'Acad. des sciences de St-Pétersbourg*, 1843.

Il existe deux genres de piles constantes : celle de Daniel et celle de Grove.

Dans la première le métal positif se dissout dans un acide; au contraire le métal négatif se précipite de sa dissolution dans ce même acide.

Prenons pour unité de l'Intensité du courant, celle qui, dans l'unité de temps, décompose un équivalent d'eau, produisant 1 gr. d'Oxygène par seconde ; dans le temps t, on dissout nJt équivalents du métal positif, et l'on en précipite autant du négatif.

Soit a_z la chaleur développée par l'oxydation d'un équivalent du métal positif et par la dissolution de l'oxyde dans l'acide; a_c celle développée par le métal négatif; la quantité de chaleur due à l'action chimique serait :

$$nJt\,(a_z - a_c).$$

La chaleur chimique est égale à la chaleur électrique, si l'on a

$$A = a_z - a_c\,;$$

c'est-à-dire si les forces électro-motrices des deux métaux ainsi combinés, sont proportionnelles à la différence des quantités de chaleur qui se dégagent par leur oxydation et leur combinaison avec les acides.

Dans la pile de Grove la polarisation est évitée en utilisant l'hydrogène pour réduire immédiatement l'acide qui entre dans la composition du liquide entourant le métal négatif. Il faut comprendre dans ce système les piles de Grove et de Bunsen, composées de zinc amalgamé, d'acide sulfurique étendu, d'acide nitrique

fumant, et de platine ou de charbon ; puis les piles à acide chromique, parmi lesquelles on a soumis aux mesures les plus exactes celles qui sont composées de zinc amalgamé, d'acide sulfurique dilué, de bichromate de potasse dissous dans de l'acide sulfurique et de cuivre ou de platine.

Les actions chimiques sont égales dans les deux piles à acide nitrique, comme dans les deux à acide chromique ; il en résulte d'après notre précédente démonstration, que les forces électro-motrices sont aussi égales, ce qui est vrai d'après les mesures de Poggendorf (1).

La pile à acide chromique et charbon est très-variable : sa force électro-motrice est considérablement plus élevée, du moins au commencement ; c'est pourquoi nous ne pouvons pas la compter ici, car évidemment elle n'est pas tout à fait libre de polarisation.

Dans ces dernières piles constantes la force électromotrice est indépendante du métal négatif ; on peut les rapporter au type de Daniel, en admettant comme derniers conducteurs de la première classe immédiatement avant le liquide, les particules d'acide nitrique et d'acide chromique en contact avec le platine ; alors on considérerait les éléments de Grove et de Bunsen, comme des piles de zinc et d'acide nitrique ; et celles à acide chromique, comme des piles de zinc et d'oxyde chromique.

Les piles à polarisation peuvent se classer dans deux groupes : celles qui donnent lieu à la polarisation sans

(1) *Annales*, t. LIV.

décomposition chimique; et celles qui donnent lieu à ces deux phénomènes à la fois.

Au premier groupe, donnant un courant variable rapidement décroissant appartiennent, parmi les plus simples, celles de Faraday (1), avec dissolution de potasse caustique, sulfure de potassium, acide nitreux; ensuite celle où les métaux négatifs sont introduits dans les acides ordinaires, alors que le métal le plus positif de la combinaison ne peut plus décomposer l'acide, par exemple le cuivre avec l'argent, l'or, le platine, le charbon dans l'acide sulfurique, etc.; parmi les plus compliquées, celles avec interposition de cellules de décomposition dans lesquelles la polarisation surmonte la force électro-motrice des autres éléments.

Jusqu'à présent la grande variabilité du courant n'a point permis de faire des expériences précises sur les intensités de ces piles. En général l'intensité de leurs courants paraît dépendre de la nature des métaux immergés; la durée croît avec l'étendue des surfaces, et avec l'affaiblissement d'intensité du courant; on peut les renouveler, même quand elles sont presque entièrement éteintes, soit par le mouvement des plaques dans le liquide, soit par leur contact avec l'air qui fait cesser la polarisation du pôle hydrogène.

On peut supposer que ce genre d'actions donne lieu à ce courant faible, mais incessant, que les instruments galvanométriques les plus délicats indiquent sous l'influence de ces piles à polarisation.

(1) *Recherches expérimentales sur l'électricité*, 16e série, *Philos. Transac.*, 1840.

Tout le phénomène est donc une action par laquelle l'équilibre électrique s'établit entre les particules liquides et les métaux. D'une part les particules liquides semblent s'ordonner autrement; d'autre part, du moins dans beaucoup de cas, il semble que des changements chimiques ont lieu dans la pellicule superficielle du métal (1).

Dans les piles composées, où la Polarisation des pôles, d'abord égaux, est l'effet du courant des autres éléments, on peut recueillir comme courant secondaire, la force perdue du courant primitif, après avoir éloigné les éléments actifs, et réuni entre eux les métaux des éléments polarisés. L'application plus explicite du principe de la Conservation de la force, manque jusqu'ici de l'appui des faits spéciaux.

Le cas le plus obscur est celui des piles dans lesquelles ont lieu simultanément la polarisation et la décomposition chimique; ce sont les piles qui développent des gaz.

Leur courant, comme dans les piles à polarisation seule, est le plus fort au commencement, et s'affaiblit plus ou moins vite jusqu'à une intensité constante.

Dans les éléments isolés de cette espèce, ou bien dans les piles composées uniquement de ces éléments, le courant de polarisation ne cesse qu'avec une lenteur extrême. Au contraire on parvient plus facilement à obtenir des courants qui deviennent rapidement constants, en combinant des piles constantes avec des éléments variables, notamment quand les plaques des derniers sont relativement petites.

(1) Ohm, *Ann. de Poggendorf*, t. LXIII, p. 389.

On a fait jusqu'ici peu d'expériences sur de telles combinaisons. D'après le petit nombre de celles dues à Lenz (1) et à Poggendorf (2), l'intensité de pareilles piles, pour différentes résistances de conducteurs, ne satisfait pas à la simple loi de Ohm; les constantes de cette loi calculées pour de faibles intensités, sont trop fortes pour les grandes intensités. Le numérateur, ou le dénominateur, ou les deux, doivent être regardés comme des fonctions de l'intensité ; les faits connus jusqu'à présent ne permettent pas de décider à cet égard.

Pour appliquer le principe de la conservation de la force à ces courants, nous les partagerons en deux parties : en une partie variable de Polarisation, à laquelle s'applique tout ce qui a été dit des courants de Polarisation pure; et une partie constante, courant de Décomposition : ce dernier peut être traité comme les courants constants sans développement de gaz.

La chaleur produite par le courant doit être égale à celle qui serait développée par l'action chimique. Par exemple, dans une combinaison de zinc et d'un métal négatif dans de l'acide sulfurique dilué, le dégagement de chaleur d'un atome de zinc lors de sa dissolution et de l'expulsion de l'hydrogène étant $a_z - a_h$, la chaleur à produire dans le temps dt, sera

$$J(a_z - a_h)dt.$$

Si le développement de chaleur dans toutes les parties d'une pareille pile, était proportionnel au carré de l'Intensité, soit $J^2 W dt$, on aurait

(1) *Pogg. Ann.*, LIX, p. 229.
(2) *Ann.*, LXVII, p. 331.

$$J = \frac{a_z - a_h}{W},$$

formule de Ohm. Mais elle ne s'applique pas ici ; d'où l'on conclut qu'il y a dans la pile des sections ou tranches dans lesquelles le développement de chaleur suit une autre loi, et dont la résistance ne peut être regardée comme constante.

Par exemple le dégagement de chaleur dans une section quelconque étant proportionnel à l'intensité, comme doit l'être entre autres la chaleur latente dans le changement d'état, savoir : $\theta = \mu J dt$, on aurait

$$J(a_z - a_h) = J^2 w + J\mu,$$
$$J = \frac{a_z - a_h - \mu}{w}.$$

La quantité μ serait introduite dans le Numérateur de la formule de Ohm ; et cette formule conviendrait dans ce même cas.

La résistance de cette section serait :

$$w = \frac{\theta}{J^2} = \frac{\mu}{J}.$$

Mais si le dégagement de chaleur de cette section n'est pas exactement proportionnel à l'intensité, c'est-à-dire si μ n'est pas constant, et croît avec l'Intensité, alors le résultat correspondra aux observations de Lenz et de Poggendorf.

Dans une telle pile, aussitôt que le courant de Polarisation cesse, la force électro-motrice doit, par analogie avec les piles constantes, être considérée comme appartenant au Zinc et à l'Hydrogène.

Dans la théorie du contact on dirait que cette force

électro-motrice est celle du Zinc et du Métal négatif, diminuée de la Polarisation du dernier par l'Hydrogène. Mais alors ce maximum de Polarisation doit être regardé comme indépendant de l'intensité du courant, et il faut supposer pour les divers métaux, des valeurs de Polarisation, ayant entre elles des différences égales à celles des forces électro-motrices.

Le numérateur de la formule de Ohm, calculé d'après les mesures des intensités avec des résistances différentes, peut contenir, outre la force électro-motrice, un terme provenant de la résistance au passage, et qui varie peut-être avec les différents métaux.

L'existence d'une résistance au passage résulte d'après le principe de la Conservation de la force de ce fait, que les intensités de ces piles ne suivent pas la loi de Ohm, bien que les actions chimiques restent les mêmes.

On n'a pas encore d'observations pouvant confirmer avec certitude, que dans les piles où cessent les courants de Polarisation, le numérateur de la formule de Ohm dépend de la nature du métal négatif.

Pour éliminer promptement les courants de polarisation, il faut autant que possible élever la *densité* du courant sur la plaque polarisée, en partie par addition de cellules à force constante, en partie par diminution des surfaces de cette plaque.

Dans les expériences qui concernent ce point, Lenz et Saweljev (1), d'après leurs propres données, n'ont pas obtenu de courant constant ; les forces qu'ils ont calculées contiennent encore celles des courants polarisés.

(1) *Bull. de la classe phys.-mathém. de l'Académie des sciences de St-Pétersbourg*, t. V, p. 1, et *Ann. de Poggend.*, LVII, p. 497.

Pour Zinc et Cuivre dans Acide sulfuriq., ils ont trouvé.				0,51
— Zinc et Fer	—	—	—	0,76
— Zinc et Mercure	—	—	—	0,90

Joule (1) a fait une expérience pour démontrer l'égalité de la chaleur développée par voie chimique et par voie électrique : cependant il y a beaucoup à dire sur ses moyens de mesure.

En effet, il admet pour la Boussole des Tangentes l'exactitude de la loi des tangentes jusqu'au plus haut degré ; il n'a pas de courants constants, mais il en calcule l'intensité par le moyen de l'inclinaison initiale et finale ; et il regarde comme constantes la force électromotrice et la résistance des auges avec développement de gaz.

E. Becquerel, dans une note des *Comptes rendus*, 1843, n° 16, croit avoir confirmé empiriquement cette loi. Hess a déjà fait remarquer l'écart de ses nombres avec les évaluations calorifiques trouvées d'une autre façon.

Pour faire concorder notre principe avec la théorie du Contact, nous avons dû fonder celle-ci sur les simples forces attractives et répulsives. Essayons de fonder de même les mouvements électriques entre les métaux et les liquides. Considérons les parties de la molécule composée d'un liquide, comme étant douées de forces attractives différentes, à l'égard des Electricités, et, par cette raison chargées différemment. Les éléments de la molécule composée se séparent aux électrodes métal-

(1) *Philosoph. Mag.*, 1841, vol. XIX, p. 273, et 1843, XX, p. 204.

liques. Chaque atome donnera, suivant la loi de l'électrolyse, à ces Electrodes, une quantité $\pm E$ d'électricité indépendante de ses forces électro-motrices.

Nous pouvons donc admettre que, même dans la combinaison chimique, les atomes sont liés avec les équivalents $\pm E$, qui sont les mêmes pour tous, comme les équivalents des substances pondérables dans les diverses combinaisons.

Deux métaux électrisés différemment étant plongés dans un liquide, sans action chimique, le métal négatif attirera les éléments positifs, et le métal positif attirera les éléments négatifs.

Il s'ensuivra un courant de polarisation qui signalera un changement de direction et un partage des particules liquides différemment électriques.

La force motrice de ce courant serait la différence électrique de ces métaux, à laquelle son intensité initiale serait proportionnelle; sa durée sera proportionnelle, pour une même intensité, à la masse d'atomes adhérents à la plaque, c'est-à-dire à la surface de celle-ci.

Dans les courants subordonnés à une action chimique, on ne parvient pas à l'équilibre durable des particules liquides avec les métaux, parce que la surface du métal positif, qui est chargée positivement, devenant partie constituante du liquide, est constamment repoussée; alors il devient nécessaire que la charge se renouvelle derrière cette tranche repoussée.

Chaque atome du métal positif qui entre dans la dissolution uni à un équivalent d'Electricité positive, et pour lequel un atome de l'élément négatif se trouve neutralisé,

provoque une accélération du mouvement déjà acquis, dans le cas où l'attraction du premier atome pour +E, désignée par a_z, est plus grande que l'attraction a_e du second atome.

Le mouvement s'accélérerait donc à l'infini, si en même temps la perte de force vive ne croissait par le dégagement de chaleur.

Elle ne croîtra que jusqu'à ce que la perte égale à $J^2W dt$, soit devenue égale à la dépense d'énergie potentielle $J(a_z - a_e)dt$ ou jusqu'à

$$J = \frac{a_z - a_e}{W}.$$

La distinction des courants galvaniques, en courants qui produisent la polarisation, et en courants qui donnent la décomposition chimique, comme l'exige le principe de la conservation de la force, paraît être la seule voie pour surmonter les difficultés de la théorie chimique et de la théorie du contact.

Courants thermo-électriques. — Dans ces courants, la source de la force se trouve aux soudures, dans les actions que Peltier a découvertes et qui produiraient un courant opposé au courant donné.

Considérons un courant hydro-électrique constant, dans le conducteur duquel on a soudé un morceau de métal différent, et dont les soudures sont portées aux températures t' et t'' : ce courant développe à chaque instant dt, dans tout le conducteur, une quantité de chaleur $J^2W dt$; il développe en outre à l'une des soudures la quantité $q'dt$, tandis qu'il absorbe à l'autre une quantité $q''dt$.

Soit A la force électro-motrice de la pile hydro-électrique ; la quantité de chaleur due à l'action chimique sera $AJdt$, et suivant la loi de la conservation de la force on aura :

$$AJ = J^2W + q' - q''. \qquad (1)$$

Soit Bt la force électro-motrice de la pile thermo-électrique quand une des soudures est portée à la température t et l'autre à une température constante quelconque, par exemple 0, toute la pile donnera :

$$J = \frac{A - Bt' + Bt''}{W} \qquad (2)$$

Posons $t' = t''$, alors :

$$J = \frac{A}{W},$$

Et l'éq. (1) devient :

$$q' = q'',$$

c'est-à-dire pour une même température des soudures des mêmes métaux et une même intensité du courant, les quantités de chaleur dégagées et absorbées sont égales et indépendantes de la section.

S'il était permis de supposer que ce phénomène est le même en chaque point de la section, alors les quantités de chaleur dégagées par le même courant, dans des surfaces de même section, seraient proportionnelles aux densités du courant, et par suite, les chaleurs dégagées par des courants différents dans toutes les sections seraient directement proportionnelles aux Intensités de ces courants.

Si les soudures ont des températures différentes, les équations (1) et (2) donnent :

$$(Bt' - Bt'')\,J = q' - q'',$$

c'est-à-dire que dans des courants d'égale intensité, la force qui dégage et absorbe la chaleur, croît dans la même proportion que la température et que la force électro-motrice.

Il n'existe pas de mesures expérimentales pour vérifier ces conséquences.

VI

EQUIVALENT DU MAGNÉTISME ET DE L'ÉLECTRO-MAGNÉTISME

Magnétisme. — Un aimant, en vertu des forces attractive et répulsive qu'il exerce sur un autre aimant, ou sur un morceau de fer, est en état de développer de la force vive.

Les phénomènes d'attractions des aimants sont complétement expliqués par la théorie des deux fluides qui s'attirent et se repoussent avec des intensités inversement proportionnelles aux carrés des distances : il en résulte que le principe de la *Conservation de la force* est applicable aux mouvements relatifs des corps magnétiques. A cause de la théorie de l'induction, nous examinerons de près les lois de ces mouvements.

1. Soient m' et m'' les masses de deux éléments magnétiques, ayant pour unité la masse qui repousse une masse égale avec une force $= 1$, à la distance $= 1$.

Désignons les magnétismes opposés par des signes contraires devant les masses ;

Soit r la distance entre m' et m'' : l'intensité de leur force centrale est :

$$\varphi = -\frac{m'm''}{r^2}.$$

La force vive acquise lors du passage de la distance V à la distance infinie, est :

$$\frac{m'm''}{r}.$$

2. Désignons cette quantité sous le nom de Potentiel des deux éléments, et reportons aux corps magnétiques la dénomination de Potentiel, adoptée déjà pour des corps électriques. L'augmentation de force vive dans le mouvement de deux corps dont le magnétisme ne varie pas, par exemple de deux barreaux d'acier aimantés, est la différence entre le Potentiel qui existe à la fin du mouvement, et celui qui existait au commencement de ce mouvement.

L'augmentation de force vive, dans le mouvement des corps magnétiques dont la distribution varie, est mesurée, comme dans les mouvements électriques, par les variations de la somme :

$$V + W_a + W_b,$$

où V est le Potentiel des corps, et où W_a et W_b sont les potentiels respectifs de chaque corps par rapport à lui-même.

Si B est un barreau d'acier invariable, le rapprochement d'un corps de magnétisme variable, développera une force vive égale à l'accroissement de la somme

$$V + W_a.$$

3. On sait que les effets extérieurs d'un aimant peuvent toujours être ramenés à une certaine distribution des fluides magnétiques à sa surface. On peut donc sub-

stituer aux Potentiels des aimants les Potentiels des surfaces magnétiques.

Alors, si l'unité de magnétisme positif passe de la surface d'un barreau de fer parfaitement doux A, aimanté par l'influence d'un aimant B, à une distance infinie, l'accroissement de sa force vive C sera donné, comme dans les conducteurs électriques, par l'équation :

$$QC = V + 2W_a .$$

Or, chaque aimant contient autant de magnétisme Boréal que d'Austral; alors $Q = 0$ dans chacun; de sorte que pour un barreau de fer, ou un barreau d'acier de même forme, de même position et d'égale répartition magnétique, dont le magnétisme est constamment neutralisé par le barreau B, on aura :

$$V = -2W_a .$$

4. Mais $-V$ est la force vive fournie par l'aimant d'acier, lorsqu'il s'approche jusqu'au point où ses magnétismes sont neutralisés. D'après cette équation, la force vive $-V$ doit être la même, quel que soit l'aimant dont il s'approche, dès qu'il arrive à la neutralisation complète, parce que W_a reste toujours constant.

Au contraire, la force vive d'un morceau de fer, égal au barreau d'acier, et qui s'approche jusqu'au point où a lieu la même répartition du magnétisme, sera donnée par la formule

$$-V - W_a = W_a ,$$

c'est-à-dire seulement la moitié de celle du barreau déjà aimanté : il ne faut pas oublier que V est es-

sentiellement négatif, et par conséquent W positif.

Si un barreau d'acier non magnétisé, approché d'un aimant distributeur, conserve en s'éloignant le magnétisme acquis, le travail mécanique absorbé est égal à W, mais alors l'aimant actuel est aussi en état de produire un travail W de plus que le barreau d'acier ne le pouvait.

Electromagnétisme. —Les phénomènes électrodynamiques ont été ramenés par Ampère aux forces attractives et répulsives des éléments de courants, dont l'intensité dépend de la vitesse et de la direction des courants.

Sa démonstration n'embrasse pas les courants d'Induction.

Ces derniers ont été réduits par W. Weber aux forces attractives et répulsives des fluides mêmes, dont l'intensité dépend de leur vitesse d'éloignement ou de rapprochement, et de l'accélération de cette vitesse.

Actuellement, aucune hypothèse n'a pu ramener ces phénomènes à des forces centrales constantes.

Les lois des courants induits ont été développées par Neumann (1), en reportant aux plus petits éléments des courants les lois trouvées par Lenz pour les courants entiers. Les lois de Neumann concordent avec les développements de Weber, pour les courants fermés.

Grassmann a substitué des forces rotatoires, aux forces attractives d'Ampère et a trouvé pour les effets électrodynamiques des courants fermés, une concordance parfaite (1).

L'expérience n'en fait pas connaître davantage, parce

(1) *Ann. de Pogg.*, LXVII, p. 31.

que jusqu'à présent on n'a expérimenté que sur des courants fermés ou presque fermés. Appliquons notre principe aux courants fermés, et montrons que les mêmes lois s'ensuivent.

Ampère a démontré que les effets électrodynamiques d'un courant fermé peuvent toujours être ramenés à une certaine distribution des fluides magnétiques sur une surface quelconque entourée par le courant. En conséquence, Neumann a attribué aux courants fermés, la conception du Potentiel, en prenant le Potentiel d'une surface dont le circuit galvanique est la limite.

5. Lorsqu'un aimant se meut sous l'influence d'un courant, la force vive qu'il gagne, doit lui être fournie par les énergies potentielles détruites dans le courant. Celle-ci, dans le temps dt, sera exprimée en unités de chaleur par $\mathrm{AJ}dt$, et en unités mécaniques par $a\mathrm{AJ}dt$, a étant l'équivalent mécanique de l'unité de chaleur.

La force vive produite dans le circuit est $a\mathrm{J}^2\mathrm{W}dt$, celle qui est gagnée par l'aimant $-\mathrm{J}\frac{d\mathrm{V}}{dt}dt$, V étant son Potentiel par rapport au conducteur parcouru par l'unité du courant. Alors

$$a\mathrm{AJ}dt = a\mathrm{J}^2\mathrm{W}dt - \mathrm{J}\frac{d\mathrm{V}}{dt}dt,$$

et par suite :

$$\mathrm{J} = \frac{\mathrm{A} + \frac{1}{a}\frac{d\mathrm{V}}{dt}}{\mathrm{W}},$$

On peut definir $\frac{1}{a}\frac{d\mathrm{V}}{dt}$ comme une nouvelle force électromotrice, c'est en réalité celle du courant d'Induc-

tion. Elle agit toujours en opposition avec celles qui meuvent l'aimant dans la direction qu'il a, ou qui accéléreraient sa vitesse. Cette force, étant indépendante de l'intensité du courant, doit aussi rester constante, s'il n'existait pas de courant avant le mouvement de l'aimant.

Si l'intensité est variable, le courant induit total pendant un certain temps sera :

$$\int J dt = \frac{1}{aW} \int \frac{dV}{dt} dt = \frac{1}{a} \frac{V'' - V'}{W};$$

V' étant le Potentiel initial, et V'' le Potentiel à la fin du mouvement. Si l'aimant se rapproche à partir d'une très-grande distance, la quantité

$$\int J dt = \frac{\frac{1}{a} V''}{W}$$

est indépendante du chemin et de la vitesse de l'aimant.

On peut énoncer ainsi la loi : *La force électromotrice totale du courant d'Induction, qui change la position d'un aimant relativement à un conducteur fermé, est égale au changement qui a lieu dans le Potentiel de l'aimant et du conducteur, quand celui-ci est parcouru par le courant* $\frac{1}{a}$.

L'unité de la force électromotrice est ici la force par laquelle l'unité de courant s'établit dans un circuit offrant une résistance égale à l'unité. Cette dernière unité est la résistance, dans laquelle l'unité de courant développe l'unité de chaleur dans l'unité de temps. C'est

la loi de NEUMANN, seulement au lieu de $\frac{1}{a}$, il a une constante indéterminée ε.

6. Lorsqu'un aimant se meut sous l'influence d'un conducteur, et que leur Potentiel pour l'unité de courant est φ; et sous l'influence d'un fer aimanté par ce même conducteur et que leur Potentiel pour le magnétisme engendré par l'unité de courant est χ, on aura comme précédemment :

$$aAJ = aJ^2W - J\frac{d\varphi}{dt} - J\frac{d\chi}{dt};$$

par suite

$$J = \frac{A + \frac{1}{a}\left(\frac{d\varphi}{dt} + \frac{d\chi}{dt}\right)}{W}.$$

La force électromotrice du courant d'Induction qui provient de la présence du fer aimanté est donc :

$$\frac{1}{a}\frac{d\chi}{dt},$$

Si le courant n produit la même distribution du magnétisme dans l'électro-aimant que l'aimant approché, d'après ce qui a été dit au n° 4, son potentiel $n\chi$ par rapport à l'aimant sera égal à son potentiel nV par rapport au fil conducteur si V est le potentiel de l'unité de courant : donc $\chi = V$. Il s'ensuit que si l'on a un courant d'Induction dû à l'aimantation du barreau de fer par l'influence de l'aimant, la force électromotrice sera $\frac{1}{a}\frac{d\chi}{dt} = \frac{1}{a}\frac{dV}{dt}$, et comme au n° 7, le courant total :

$$\int J dt = \frac{\frac{1}{a}(V'' - V')}{W},$$

V′ et V″ étant les potentiels du fer aimanté par rapport au fil conducteur, avant et après l'aimantation.

Neumann tire cette loi par analogie du cas précédent.

7. Lorsqu'un électro-aimant devient magnétique sous l'influence d'un courant, il se perd de la chaleur par le courant d'Induction. Si le barreau de fer est doux, l'ouverture donnera lieu à un courant d'Induction en sens contraire, et la chaleur sera restituée.

Si c'est de l'acier qui conserve son magnétisme, cette chaleur est perdue, mais elle fait place à une force motrice gagnée égale au Potentiel de cet aimant, comme on l'a dit au n° 4. M. Neumann est arrivé à la même conclusion, en partant des expériences de M. Lenz.

8. Lorsque deux courants fermés se meuvent l'un vers l'autre, l'intensité du courant peut changer dans les deux. Si V est leur Potentiel pour l'unité de courant, on aura comme dans les cas précédents et pour les mêmes motifs :

$$A'J' + A''J'' = J'^2W' + J''^2W'' - \frac{1}{a} J'J'' \frac{dV}{dt}.$$

Si l'intensité W″ du courant dans l'un des conducteurs est beaucoup plus faible que l'intensité W′ de l'autre, de sorte que la force électromotrice d'Induction provoquée par W″ dans W′, disparaît devant la force A′, et si nous pouvons poser $J = \frac{A'}{W'}$, nous aurons par l'équation précédente :

$$J'' = \frac{A'' + \frac{1}{a} J' \frac{dV}{dt}}{W''}.$$

La force d'induction électromotrice est donc la même qu'un aimant produirait s'il avait la même force électro-dynamique que le courant inducteur. W. Weber a démontré cette loi par expérience (1).

Si au contraire l'intensité W′ est très-petite par rapport à W″, on a :

$$J' = \frac{A' + \frac{1}{a} J'' \frac{dV}{dt}}{W'}.$$

Les forces électromotrices des conducteurs l'un pour l'autre sont donc égales, si les intensités des courants sont égales, quelle que soit la forme des conducteurs.

La force d'induction totale qui, pendant un certain mouvement des conducteurs l'un vers l'autre, produit un courant qui ne change pas même par l'Induction, est donc encore égale à la variation du Potentiel de ce courant par rapport à l'autre conducteur parcouru par le courant $\frac{1}{a}$.

C'est sous la même forme que Neumann déduit la loi de l'analogie des forces magnétiques et électro-dynamiques, et qu'il l'étend aussi au cas où l'induction existe dans les conducteurs immobiles par le renforcement ou l'affaiblissement des courants.

W. Weber démontre l'accord de son hypothèse sur les forces électro-dynamiques avec ces théorèmes (2).

(1) *Déterminations électrodynamiques*, pp. 71-75.
(2) *Déterm. électrodyn.*, p. 147-153.

Il n'y a rien à conclure de la loi de la Conservation des forces pour ce cas : si ce n'est que la réaction du courant induit sur l'inducteur doit affaiblir ce dernier, et que cet affaiblissement correspond à une perte de chaleur égale à la quantité de chaleur développée par le courant induit.

La même relation doit exister, dans l'action du courant sur lui-même, entre l'affaiblissement initial et l'extra-courant.

Il n'y a pas de conclusions plus étendues à tirer, car la forme de l'accroissement des courants n'est pas connue ; en outre la loi de Ohm n'est pas immédiatement applicable, parce que ces courants ne pourraient pas occuper simultanément toute l'étendue du conducteur (1).

Il reste encore parmi les actions naturelles, celles des êtres organisés. La plupart des phénomènes de la végétation sont chimiques ; dans quelques-unes, il y a un léger dégagement de chaleur. Il s'y accumule principalement une grande quantité d'énergie chimique, dont l'équivalent de chaleur nous est restitué dans la combustion des plantes.

La seule force vive absorbée d'après nos connaissances pendant la croissance des plantes, est celle des rayons chimiques du soleil. Mais il nous manque encore les données qui nous permettraient de comparer les équi-

(1) L'auteur a déterminé dans un travail ultérieur la forme de l'accroissement et la durée de ces courants (*Ann. de Poggendorf*, t. LXXXIII).

valents de force perdus et gagnés dans ces phénomènes.

Quant aux animaux, on possède déjà quelques points de départ. Ils absorbent de l'oxygène et les combinaisons oxydables compliquées que les plantes ont formées ; ils rendent ces combinaisons pour la plupart brûlées à l'état de CO^2 et H^2O, et une partie, réduites en combinaisons plus simples. Ainsi les animaux dépensent une certaine quantité d'énergie chimique, et produisent de la chaleur et de la force mécanique.

Celle-ci correspond à une quantité de travail relativement petite comparée à la quantité de chaleur ; la question se réduit donc d'après le principe de la Conservation de la force, à savoir si la combustion et la décomposition des substances servant à la nourriture forment une quantité de chaleur égale à celle que les animaux restituent. La réponse est affirmative du moins très-approximativement d'après les expériences de Dulong et Despretz (1).

Pour terminer il faut mentionner quelques observations de Matteucci contre la manière de voir présentée ici (2). Ce savant se fonde sur le principe que, d'après cette théorie, une action chimique ne pourrait pas donner autant de chaleur, quand elle donne de l'Électricité, du Magnétisme ou de la Lumière, que quand cela n'a pas lieu ; tandis qu'il s'efforce d'établir par une

(1) L'auteur a approfondi davantage cette question dans le *Dictionnaire encyclopédique des sciences médicales*, à l'article Chaleur, et dans le recueil intitulé *Progrès de la physique en* 1845, publié par la *Société de physique de Berlin*, p. 346.

(2) *Biblioth. univ. de Genève*, Suppl., n° 16, 1847, 15 mai, p. 375.

série de mesures, que le Zinc par sa dissolution dans l'Acide produit tout autant de chaleur, quand cette dissolution se fait immédiatement par l'affinité chimique, que quand elle forme une pile avec du platine ; et qu'un courant électrique qui fait incliner un aimant, produit autant d'effets chimiques et thermiques que sans cette déviation.

Matteucci considère ces faits comme des objections, faute de comprendre le point de vue qu'il veut combattre, comme on le verra en les comparant à nos déductions. Il rapporte deux essais calorimétriques sur la chaleur qui se dégage dans la combinaison de la Baryte caustique avec de l'Acide sulfurique concentré ou étendu, et sur la chaleur produite par un même courant électrique dans un fil plongé dans des gaz de différents pouvoirs refroidissants : dans ces essais, la baryte et le fil sont quelquefois incandescents, et d'autres fois ne le sont pas.

Il trouve ces quantités de chaleur aussi grandes dans un cas que dans l'autre. Mais si l'on a égard à l'imperfection de nos appareils calorimétriques, on peut admettre que la quantité de chaleur développée par les rayons lumineux, étant trop petite, a passé inaperçue dans ses expériences.

Dans la première expérience de Matteucci, l'union de la Baryte et de l'Acide sulfurique a lieu dans un vase athermane de plomb : les rayons lumineux ne peuvent s'en échapper.

Nous n'insisterons pas sur l'imperfection de la méthode de Matteucci. En résumé, nous croyons avoir démontré que notre loi n'est en contradiction avec aucun

des faits connus de la science ; et elle est confirmée au contraire par un grand nombre.

Nous nous sommes efforcé de présenter toutes les conséquences qui attendent encore leur confirmation expérimentale, et qui peuvent être déduites de la combinaison de notre principe avec les lois des phénomènes naturels connues jusqu'ici.

Le but de cette recherche servira d'excuse aux parties hypothétiques : l'auteur a voulu présenter aussi complétement que possible au physicien, la fécondité théorique et pratique de cette loi, dont la démonstration définitive peut être considérée comme un problème réservé à l'avenir le plus prochain de la science.

FIN

TABLE DES MATIÈRES

	Pages.
Préface du Traducteur	1
Exposé élémentaire de la transformation des forces de la nature	5
Mémoire sur le principe de la conservation de la force.	
Introduction	57
I. — Principe de la Conservation de la Force vive	65
II. — Principe de la Conservation de la Force	73
III. — Application aux théorèmes de la Mécanique	81
IV. — Équivalent de la Force et de la Chaleur	87
V. — Équivalent mécanique des phénomènes électriques.	100
Électricité statique	100
Galvanisme	107
Courants thermo-électriques	122
VI. — Équivalent du Magnétisme et de l'Électro-Magnétisme	125
Magnétisme	125
Électro-Magnétisme	128

FIN DE LA TABLE.

Corbeil, typ. et stér. de Crété.

DU MÊME AUTEUR

Optique physiologique, traduite par MM. Ém. Javal et M. Klein. 1 vol. grand in-8 de 1057 pages, avec 215 figures dans le texte et un atlas de 11 planches..... 30 fr.

Théorie physiologique de la musique, fondée sur l'étude des sensations auditives ; traduit par M. Georges Guéroult. 1 vol. in-8 de 600 pages, avec 57 figures. Prix..... 11 fr.

A LA MÊME LIBRAIRIE

ŒUVRES D'ÉMILE VERDET

PUBLIÉES PAR LES SOINS DE SES ÉLÈVES

8 volumes gr. in-8, avec figures dans le texte

IMPRIMÉ PAR L'IMPRIMERIE IMPÉRIALE

Prix : 75 fr.

ON VEND SÉPARÉMENT

Introduction. — Mémoires originaux. 1 vol. in-8. 12 fr.

Cours de physique professé à l'École polytechnique, publié par M. Fernet. 2 vol..... 24 fr.

Conférences de physique faites à l'École normale, publiées par M. Gernez. 1 vol. in-12..... 12 fr.

Leçons d'optique physique, publiées par M. Levistal. 2 vol. avec figures..... 24 fr.

Théorie mécanique de la chaleur, publiée par MM. Prudhon et Violle. 2 vol. grand in-8..... 24 fr.

CORBEIL, typ. et stér. de CRÉTÉ FILS.